



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií



PROUDOVÁ A TEPLOTNÍ STABILIZACE DIODOVÝCH LASEROVÝCH ZDROJŮ PRO UŽITÍ V OPTICKÉ INTERFEROMETRII

Diplomová práce

<i>Studijní program:</i>	N2612 - Elektrotechnika a informatika
<i>Studijní obor:</i>	3906T001 - Mechatronika
<i>Autor práce:</i>	Bc. Michal Kohl
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

CURRENT AND TEMPERATURE STABILIZATION OF LASER DIODE SOURCES FOR OPTICAL INTERFEROMETRY

Diploma thesis

Study programme: N2612 - Elektrotechnika a informatika
Study branch: 3906T001 - Mechatronika
Author: **Bc. Michal Kohl**
Supervisor: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Kohl**
Osobní číslo: **M12000254**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Proudová a teplotní stabilizace diodových laserových zdrojů
pro užití v optické interferometrii**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte principy přesných proudových zdrojů a teplotní stabilizace pro laserové diody.
2. V nově vyvíjeném přesném proudovém zdroji navrhnete a realizujete jednotku napájecích zdrojů a spolupracujte na vývoji a testování ostatních komponent proudového zdroje (ADC, DAC, teplotní stabilizace, ...).
3. Změřte a porovnejte vlastnosti dostupných komerčních proudových zdrojů a nově vyvíjeného zdroje.
4. Na základě měření definujte parametry proudových zdrojů pro užití v optické interferometrii při výrobě asférických čoček.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: cca 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] Vrbová, M.: Lasery a moderní optika. BEN, Praha 2014, ISBN 80-85849-56-9.
- [2] Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. BEN, Praha, 2004, 159 s. ISBN 80-730-0110-1.
- [3] Kopecký, V.: Laserová enemometrie v mechanice tekutin, TRIBUN EU, Brno, ISBN 978-80-7399-357-3.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Vojtíšek

ÚFP AV ČR, v.v.i.

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016



prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan



doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 4. 1. 2016

Podpis: 

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost při realizaci konstrukčních prací, měření na proudovém zdroji a sepisování závěrečné zprávy této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svému konzultantovi Ing. Petru Vojtíškoví za cenné připomínky, čas, podporu při měření na zdrojích a vyhodnocování výsledků měření. Děkuji Ing. Vítu Lédlovi, Ph.D. za možnost realizace této diplomové práce v Regionálním centru speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC.

Neméně významný dík patří také mé rodině za podporu během celé doby mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá charakterizací zdrojů od renomovaných výrobců a nově vyvíjeného zdroje pro laserové diody, zejména z hlediska jejich předpokládaného použití s důrazem na dlouhodobou teplotní stabilitu vlnové délky. Tato práce zahrnuje měření stability optického výkonu, vlnové délky, interferenčních proužků, stability průběhu získaného z Fabry-Perotova interferometru a měření vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje. Tato práce je také zaměřena na návrh části proudového zdroje.

Klíčová slova

Fabry-Perotův interferometr, interferenční proužky, laser, laserová dioda, Peltierův článek, proudový zdroj, teplotní stabilizace, vlnová délka

Annotation

The diploma thesis deals with a characterization of power supplies from reputable manufacturers and newly developed power supply for laser diodes, especially in terms of their expected application with an emphasis on a long-term thermal stability of a wavelength. This thesis involves measurement the stability of an optical power, a wavelength, interference fringes, the stability of the signal obtained from the Fabry-Perot interferometer and measurement of the influence of ambient temperature on the electronics of the power supply. This thesis is also focused on the design of the part of current power supply.

Keywords

current power supply, Fabry-Perot interferometer, interference fringes, laser, laser diode, Peltier element, temperature stabilization, wavelength

Obsah

Seznam obrázků	10
Seznam použitých symbolů.....	12
Seznam použitých zkratk.....	14
Úvod.....	15
1 Teoretický rozbor	16
1.1 Lasery, princip činnosti a jejich dělení.....	16
1.2 Laserová dioda	20
1.3 Vliv změny teploty a proudu na vlnovou délku laserové diody	21
1.4 Proudové zdroje pro laserové diody.....	23
1.5 Peltierův článek	24
1.6 Interference vlnění a interferometr.....	26
1.6.1 Proužková viditelnost.....	27
1.6.2 Fabry-Perotův Interferometr	28
2 Měření kvality asférických optických ploch	30
2.1 Metody geometrické optiky	33
2.2 Interferenční metody	34
3 Přehled komerčních zdrojů	38
4 Požadované parametry proudového zdroje PLCS 100.....	39
5 Návrh proudového zdroje s teplotní a proudovou stabilizací PLCS 100	40
5.1 Schéma proudového zdroje PLCS 100.....	40
5.2 Návrh spínaného zdroje pro PLCS100.....	41
5.3 Proudový zdroj s teplotní regulací PLCS100	42
5.4 Návrh čelního a zadního panelu proudového zdroje PLCS 100	42
6 Měření vlastností dostupných komerčních zdrojů a nově vyvíjeného zdroje	44
6.1 Měření optického výkonu	45
6.1.1 Výsledky měření pro měření optického výkonu	45
6.1.2 Vyhodnocení měření optického výkonu	47
6.2 Měření vlnové délky	48
6.2.1 Výsledky měření pro měření vlnové délky	48
6.2.2 Doba ustálení vlnové délky laserové diody QFBGLD-633-5	50
6.2.3 Vyhodnocení měření vlnové délky	50
6.3 Měření na Fabry-Perotově interferometru.....	52
6.3.1 Výsledky měření pro měření na Fabry-Perotově interferometru	53
6.3.2 Vyhodnocení měření na Fabry-Perotově interferometru.....	57

6.4	Měření stability interferenčních proužků	58
6.4.1	Výsledky měření pro měření stability interferenčních proužků	60
6.4.2	Vyhodnocení měření interferenčních proužků	62
6.5	Měření optického výkonu a vlnové délky v závislosti na změně proudu a teploty.....	63
6.5.1	Vyhodnocení měření závislosti optického výkonu a vlnové délky na změně proudu a teploty	65
6.6	Vliv okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje	66
6.6.1	Vyhodnocení měření vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje.....	68
Závěr		69
Literatura.....		70
Příloha A - ovládací panely.....		73
Příloha B - tabulky		74

Seznam obrázků

Obr. 1: Spontánní emise.....	16
Obr. 2: Absorpce.....	17
Obr. 3: Stimulovaná emise.....	17
Obr. 4: a) Optický rezonátor, b) Závislost zisku a ztrát rezonátoru na výkonu	18
Obr. 5: Laserový oscilátor	19
Obr. 6: Příklad typu pouzdra laserové diody QFBGLD-633-5	20
Obr. 7: DBR dioda - režim HOP-FREE při změně napájecího proudu [22]	22
Obr. 8: DBR dioda - režim HOP-FREE při změně teploty čipu [22]	23
Obr. 9: Ideální zdroj proudu - závislost napětí na proudu	23
Obr. 10: Reálný zdroj proudu - závislost napětí na proudu.....	24
Obr. 11: Reálný zdroj proudu - náhradní schéma	24
Obr. 12: Peltierův článek.....	25
Obr. 13: Peltierův modul [23]	25
Obr. 14: Schéma Fabry-Perotova interferometru.....	28
Obr. 15: Kavita Fabry-Perotova interferometru [30]	29
Obr. 16: Zobrazení sférickou a asférickou čočkou	30
Obr. 17: Zobrazovací soustava rozhraní zobrazujícího stigmaticky z A do A'	31
Obr. 18: Zobrazovací soustava rozhraní stigmaticky zobrazujícího z nekonečna do F'	32
Obr. 19: Schéma Fizeauova interferometru.....	35
Obr. 20: Vznik moiré interference vlivem natočení dvou rastrů.....	37
Obr. 21: Blokové schéma proudového zdroje PLCS 100 zapojeného k laserové diodě.....	40
Obr. 22: Plošný spoj proudového zdroje s teplotní stabilizací PLCS 100	42
Obr. 23: PLCS100 - pohled na přední panel	43
Obr. 24: PLCS100 - pohled na zadní panel.....	43
Obr. 25: Blokové schéma zapojení pro měření optického výkonu	45
Obr. 26: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 10 minut	45
Obr. 27: Detail časového vývoje optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 60 sekund.....	46
Obr. 28: Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky	48
Obr. 29: Časový průběh vlnové délky laserové diody pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 10 minut	49
Obr. 30: Časový průběh vlnové délky laserové diody pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 60 sekund	49
Obr. 31: Blokové schéma pro měření na Fabry-Perotově interferometru	52
Obr. 32: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru pro zdroj PLCS 100 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C	53
Obr. 33: Detail rezonančního peaku pro zdroj PLCS 100 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C ...	53
Obr. 34: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru s parazitními peaky pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 115 mA a teplotě 25 °C	54
Obr. 35: Blokové schéma zapojení pro měření interferenční struktury	58
Obr. 36: Detailní geometrický popis vzniku interferenční struktury.....	58
Obr. 37: Ukázka interferenční struktury pro zdroj Thorlabs při napájecím proudu 80 mA a 25 °C	60
Obr. 38: Závislost vlnové délky na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C ...	63
Obr. 39: Závislost vlnové délky na změně teploty laserové diody při 95 mA.....	63

<i>Obr. 40: Závislost optického výkonu na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C</i>	64
<i>Obr. 41: Závislost optického výkonu na změně teploty laserové diody při 95 mA</i>	64
<i>Obr. 42: Měření vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje</i>	66
<i>Obr. 43: PLCS 100 - 80 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu</i>	66
<i>Obr. 44: PLCS 100 - 95 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu</i>	67
<i>Obr. 45: PLCS 100 - 115 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu</i>	67
<i>Obr. 46: Čelní panel proudového zdroje PLCS 100</i>	73
<i>Obr. 47: Zadní panel proudového zdroje PLCS 100</i>	73

Seznam použitých symbolů

c	$m \cdot s^{-1}$	rychlost světla
c_1	$Hz \cdot s^{-1}$	kalibrační konstanta
E_{01}, E_{02}	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
E_1	J	nižší energetická hladina
E_2	J	vyšší energetická hladina
E_2	J	vyšší energetická hladina
F_t	$Hz \cdot s^{-1}$	jakost interferometru a optického záření
FWHM	s	šířka v půlce peaku
h	$J \cdot s$	Planckova konstanta
H	m	výška
H_p	V	výška peaku
I	A	el. proud
I_{Fmax}	A	maximální propustný proud laserovou diodou
I_i	A	proud tekoucí vnitřním odporem zdroje
I_K	A	zkratovací proud zdroje
I_{th}	A	prahový proud laserové diody v propustném směru
t	s	čas
T	$^{\circ}C$	teplota
T_{min}	$^{\circ}C$	minimální teplota laserové diody
T_{max}	$^{\circ}C$	maximální teplota laserové diody
u		vlnová funkce
U	V	svorkové napětí zdroje
P_{fmax}	W	maximální výkon laserové diody
P	W	výkon laserové diody

r	m	poloměr zakřivení zrcadel
R	Ω	zatěžovací odpor
R_i	Ω	vnitřní odpor zdroje
α	$^\circ$	úhel mezi laserovými paprsky
ϑ	$^\circ\text{C}$	teplota laserové diody
$d\lambda/dT$	m/K	teplotní koeficient laserové diody
$d\lambda/dI$	m/A	proudový koeficient laserové diody
λ_c, λ	m	vlnová délka laserové diody
ν	Hz	frekvence fotonu
χ	$^\circ$	polarizační faktor
ΔT	s	vzdálenost mezi peaky
$\Delta \nu$	Hz	šířka spektra laserové diody
Δx	m	pohyb struktury
Δz	s	pohyb struktury
Λ	m	perioda interferenční struktury

Seznam použitých zkratek

A/D	analogově-digitální převodník
APC	druh optického vlákna
CorelDRAW X7	software pro grafické návrhy
D/A	digitálně-analogový převodník
FPI	Fabry-Perotův interferometr
LD	laserová dioda (laser diode)
TEC	termoelektrické chlazení (thermo-electric cooler)
TOPTEC	Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů v Turnově
PC	osobní počítač
P ₁ , P ₂	držáky optických vláken

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá rozбором vlastností proudových zdrojů, měřením zdrojů od renomovaných výrobců a nově vyvíjeného zdroje, a to zejména z hlediska jejich předpokládaného použití s důrazem na dlouhodobou teplotní stabilitu vlnové délky. Podnět pro stavbu nového zdroje přišel ze strany Centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, sídlícím v Turnově, na základě nevyhovujících vlastností dostupných průmyslových zdrojů pro laserové diody.

S první koncepcí stavby proudového zdroje již dříve přišel Ing. Jaroslav Novotný z Turnova, který postavil funkční model proudového zdroje pro laserové diody. Podle laborantů výzkumného centra byl ovšem tento zdroj svými parametry nedostatečný jako napájecí zdroj k laserové diodě při použití na interferometrická měření. Z tohoto důvodu se rozhodlo o návrhu nového a lepšího zařízení, které by vyhovovalo lépe svými parametry pro jimi prováděná měření.

Tato práce popisuje svým teoretickým rozбором funkci laserů, laserových diod, proudových zdrojů pro napájení laserových diod a jejich teplotní stabilizaci. Dále obsahuje teoretické znalosti ohledně měření asférických ploch, konstrukce a funkce Peltierova článku, interference a konkrétně Fabry-Perotova interferometru.

Cílem této práce je porovnání dostupných průmyslových zdrojů s proudovou a teplotní regulací k napájení laserových diod a nově vyvíjeného zdroje z pohledu stability výkonu a stability vlnové délky.

Nestabilita vlnové délky vede k nestabilitě interferenčních proužků, které jsou získávány jako měřená data při interferometrických měřeních. Toto je docela běžná vlastnost zejména u lacinějších laserových diod. Cena těchto diod se pohybuje v rozmezí desítky až desetitisíce korun českých. Laserové diody se liší zejména výkonem, jinak ostatní parametry jsou téměř stejné. Mírnější nestabilita nemusí být pro některá měření závažným problémem a stačí, pokud je laserový paprsek stabilní z hlediska vlnové délky pouze po určitou dobu k získání potřebných dat.

Dalšími kritérii k určení nejvhodnějšího zdroje pro laserovou diodu je měření stability interferenčních proužků a stability signálu z Fabry-Perotova interferometru. Měření stability interferenčních proužků vede k nahrávání krátkých videí, z nichž je následně vyhodnocována vlnová délka zdroje optického záření a stabilita interferenční struktury. Měření na Fabry-Perotově interferometru zahrnuje pořízení záznamu z obrazovky osciloskopu při rezonanci kavity s vlnovou délkou paprsku zdroje laserového záření nebo jejími celočíselnými násobky.

1 Teoretický rozbor

Tento teoretický úvod popisuje základní princip funkce laseru, laserové diody, proudového zdroje, teplotní stabilizace laserových diod, měření asférických ploch pomocí laseru, Peltierova článku, interference vlnění a Fabry-Perotova interferometru.

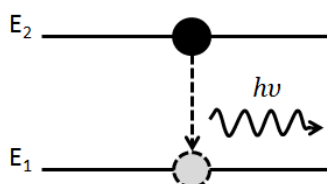
1.1 Lasery, princip činnosti a jejich dělení

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zařízení, kde dochází k zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je optickým zdrojem, generátorem koherentního monochromatického elektromagnetického záření, které je vyzařováno v úzkém paprskovém svazku. Koherentní záření je takové záření, které má v časovém vývoji stále stejnou frekvenci a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. Monochromaticností záření se rozumí záření o jedné vlnové délce či velice úzkém intervalu vlnových délek. Výhodou laseru je, že může vyzařit velké množství energie na malou plochu i v krátkém čase. Dalšími výhodami, resp. vlastnostmi oproti ostatním zdrojům světla, jsou koherence záření, monochromaticnost, malá divergence svazku, velká výkonová hustota [18, 28, 41].

Při interakci fotonu s atomem rozlišujeme absorpci a emisi. K interakci fotonu s atomem dochází tehdy, pokud má letící foton energii rovnou rozdílu mezi dvěma energetickými hladinami. Energetické hladiny systému molekul se vytvářejí v důsledku molekulárních vibrací či rotací a následkem potenciální energie elektronů v přítomnosti atomových jader a ostatních elektronů. Energie, kterou foton předá atomu, aby atom mohl přejít na vyšší energetickou hladinu, je dána vzorcem č. 1, kde h je Planckova konstanta, ν je frekvence fotonu, E_2 je vyšší energetická hladina a E_1 je nižší energetická hladina [28].

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

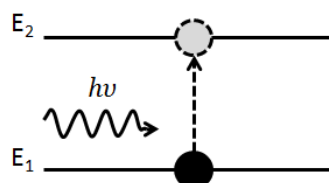
Spontánní emise (obr. 1) je jev, při kterém se atom nachází na vyšší energetické hladině a dojde-li k uvolnění jeho energie ve formě fotonu, tak atom přechází na nižší energetickou hladinu. Tento přechod na nižší energetickou hladinu nikterak nezávisí na počtu fotonů [28].



Obr. 1: Spontánní emise

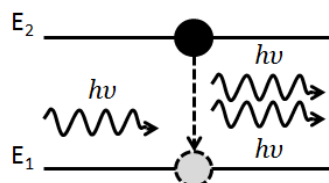
Absorpce (obr. 2) je jev, při kterém foton dopadající na atom předá svoji energii atomu a atom přejde na vyšší energetickou hladinu, pokud má energii potřebnou pro přechod. Foton

tedy zanikne. Absorpce je přechod indukovaný fotonem. Na této hladině setrvává atom pouze omezenou dobu a následně se vrací na původní energetickou hladinu. Při zpětném přechodu rozdílovou energii buď vyzáří a nebo předá okolí ve formě tepla. V krátkém okamžiku po absorpci tedy nastává spontánní emise. Atom při přechodu na nižší energetickou hladinu vyše foton o stejné energii do okolí náhodným směrem [28].



Obr. 2: Absorpce

Třetí interakcí mezi fotonem a atomem je stimulovaná emise (obr. 3). Stimulovaná (vynucená) emise je jev, při kterém je atom na vyšší energetické hladině a jeho přechod na nižší energetickou hladinu není samovolný, ale je vynucen dalším fotonem. Tento přechod má tedy vliv na fotonové zesílení a tudíž je základem činnosti laserů. Stimulovaná emise je opakem absorpce fotonu [28].

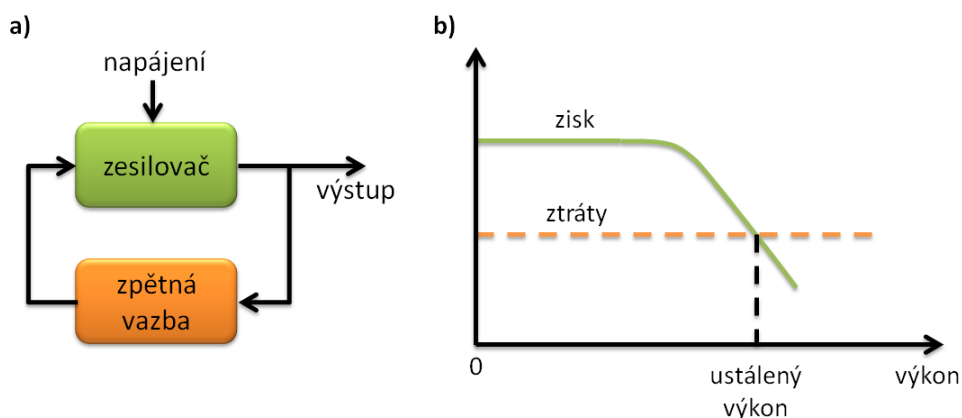


Obr. 3: Stimulovaná emise

Zařízení, které je nazýváno koherentním optickým zesilovačem, zvětšuje amplitudu optického signálu, ale jeho fázi nikterak neovlivňuje. Pokud je optický signál vstupující do koherentního optického zesilovače monochromatický, tak se na výstupu tohoto zařízení objeví zesílený monochromatický signál o stejné frekvenci, ale fáze zůstane stejná a nebo bude posunutá o pevnou hodnotu. Amplituda výstupního optického signálu bude tedy vyšší než amplituda vstupního optického signálu. Nekoherentní optický zesilovač zesiluje amplitudu vstupního optického signálu, ale fázi nezachovává. Koherentní záření je zesilováno pomocí stimulované emise. Frekvence atomových, molekulových nebo laserových zesilovačů s pevnou látkou je určena rozdíly mezi energetickými úrovněmi. Běžně v přírodě se vyskytující látky zeslabují světlo, které jimi prochází. Tento jev je způsoben absorpcí velkého počtu atomů na nižší energetické hladině. Absorpce tedy výrazně převyšuje nad stimulovanou emisí, jelikož na vyšší energetické hladině je počet atomů výrazně nižší než počet atomů na nižší energetické hladině. Z tohoto důvodu, aby látka zesilovala koherentní záření, musí být obsazení atomů na vyšší energetické hladině početnější než na nižší energetické hladině. Toto je nazýváno jako

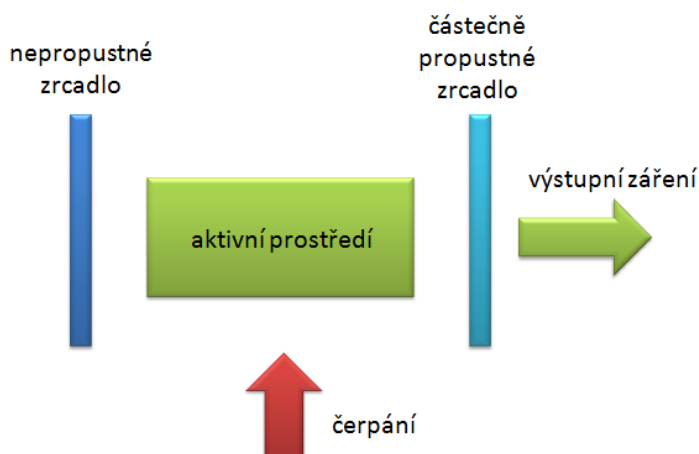
tzv. nerovnovážený stav. K tomuto inverznímu obsazení atomů je potřeba zdroj excitace neboli čerpání atomů na vyšší energetickou hladinu. Čerpání může být prováděno opticky, elektricky nebo chemicky. Zisk neboli zesílení reálného koherentního optického zesilovače je frekvenčně závislé a fázové posunutí rovněž. Zesilovače mohou též dosahovat tzv. saturace, která je projevem nelineárních vlastností zesilovače. Nelineárními vlastnostmi zesilovače je míněno, že při lineárním růstu vstupního napětí přestává růst amplituda výstupního signálu. Saturace vnáší do výstupního signálu harmonické složky. Problém může nastat při zesilování šumu, který se zesílený přenáší do výstupního signálu spolu se zesíleným vstupním signálem. Šum také způsobuje spontánní emise přítomná v optickém zesilovači. Hlavním zdrojem šumu je záření vzniklé spontánní emisí a není závislé na vstupním optickém signálu. Část šumu vzniklého spontánní emisí lze částečně odfiltrovat úzkopásmovým optickým filtrem spolu s polarizačním filtrem, protože spontánní emise je vyzařována do všech směrů. Touto filtrací resp. polarizací je získáván výstupní optický signál, který je vyzařován do prostoru pouze v určitém malém úhlu. Zesílení optického zesilovače je úměrné rozdílu obsazení energetických hladin atomy [28].

Laser je optický oscilátor či rezonátor (obr. 4a), který obsahuje rezonanční optický zesilovač zařízení. Výstupní signál tohoto zařízení je zpětnou vazbou přiváděn zpět na vstup. Tato zpětná vazba musí být ve stejné fázi jako zesilovaný vstupní optický signál. Zesilováním vstupního signálu bude narůstat výstupní signál až do doby, dokud nedojde k saturaci zisku. Tato saturace uvede optický oscilátor do ustáleného stavu. V tomto stavu generuje optický oscilátor při rezonanční frekvenci výstupní optický signál. Ke vzniku oscilací je nutné, aby byl zisk zesilovače větší než ztráty ve zpětné vazbě a změna fáze při jednom oběhu regulační smyčky celočíselným násobkem 2π . Takovýto nestabilní systém začne oscilovat. Vlivem vzrůstajícího výkonu bude docházet k saturaci zesilovače a zisk začne klesat pod svojí původní hodnotu (obr. 4b) [28].



Obr. 4: a) Optický rezonátor, b) Závislost zisku a ztrát rezonátoru na výkonu

Soustava oscilátoru se nachází v rovnováze, pokud zisk poklesne na hodnotu ztrát zpětné vazby. Ztráty jsou kompenzovány ziskem, čímž se cyklus opakuje beze změny a na výstupu oscilátoru jsou stacionární oscilace. Obě oscilační podmínky jsou splněné pro jednu či více frekvencí. Tyto frekvence jsou označovány jako rezonanční frekvence oscilátoru. Zpětnou vazbu tvoří aktivní prostředí v optickém rezonátoru. Aktivní prostředí je umístěné mezi 2 zrcadla (obr. 5), mezi nimiž dochází k odrazům fotonů. Výstupní záření prochází skrz jedno ze zrcadel, jež je částečně propustné [28].



Obr. 5: Laserový oscilátor

Lasery lze dělit dle [27]:

- a) aktivního prostředí
 - 1. plynové lasery
 - 2. kapalinové lasery
 - 3. pevnolátkové lasery
 - 4. polovodičové/diodové lasery
- b) vlnového spektra
 - 1. infračervené
 - 2. viditelné pásmo
 - 3. ultrafialové
 - 4. rentgenové
- c) délky vyzářeného pulzu
 - 1. kontinuální
 - 2. pulzní ns
 - 3. pulzní ps/fs
- d) typu kvantových přechodů
 - 1. molekulární
 - 2. elektronové

3. jaderné
- e) typu buzení
1. opticky
 2. elektrickým výbojem
 3. injekcí nosičů náboje
 4. chemicky
 5. elektronovým svazkem
 6. tepelnými změnami
 7. rekombinací

1.2 Laserová dioda

Jedním z typů laserů jsou polovodičové lasery neboli laserové diody (obr. 6). Základem každé polovodičové diody je PN přechod, na kterém se elektrická energie přeměňuje na světelné záření. Aktivním prostředím je zde tedy polovodič. Výstupní záření je monochromatické a koherentní, a je generováno ve formě velmi úzkého svazku s malou rozbíhavostí v úzkém intervalu vlnových délek [16, 17].



Obr. 6: Příklad typu pouzdra laserové diody QFBGLD-633-5

Zdrojem tohoto záření je stojaté vlnění, které vzniká uvnitř dutiny rezonátoru. Princip funkce laserové diody je založen na procesu stimulované emise stejně jako u jakéhokoli jiného laseru. V polovodičích typu PN jsou atomy velmi blízko vedle sebe. Přechody atomů se nerealizují přechodem na vyšší energetickou hladinu, ale přechodem mezi tzv. energetickými pásy. Jedná se o valenční pás, zakázaný pás a vodivostní pás. V tomto případě dochází k vyzařování spontánního záření s náhodnou fází, které se šíří do všech směrů. Tyto diody využívají tzv. kladné zpětné vazby, kde se část vstupního signálu vrací z výstupu na vstup. Za tímto účelem se používají různé typy rezonátorů. Pokud se stimulované zesílení rovná ztrátám, tak rezonátor přechází do laserového režimu a výstupní optické záření se stává koherentním. Rezonátor s definovanou fází a zesílením zajistí vznik stojatého vlnění. Kvalita rezonátoru určuje stupeň koherence [17].

Dioda přechází z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise při prahovém proudu, tedy z nekoherentního zdroje se stává koherentní zdroj záření. Po dosažení prahového

proudu dochází k prudkému nárůstu výkonu stimulovaného záření, které je koherentní a je lineárně závislé na budícím proudu laserové diody [17].

Oblast použití laserových diod je velmi rozsáhlá. Používají se zejména jako zdroje pro optické vlnovody, v CD mechanikách atd. Cena laserových diod se pohybuje v rozmezí od desítek korun po desetitisíce. Vyrábějí se v mnoha různých typech pouzder [17].

1.3 Vliv změny teploty a proudu na vlnovou délku laserové diody

Vlastnosti laserové diody se liší zejména technologií výrobního provedení. V závislosti na tomto provedení je nutné zvážit volbu pracovního bodu laserové diody tj. proudu a teploty, aby nedocházelo k modulacím tj. nestabilitě vlnové délky laserové diody.

Jednou z technologických variant jsou tzv. DBR lasery (distributed Bragg reflector), které se vyznačují zejména úzkou šířkou pásma vlnové délky. U těchto diod se při zvýšení teploty čipu změní index lomu tzv. epitaxní vrstvy a tím dojde ke změně pracovního režimu diody a posunu k delší vlnové délce. Posun vlnové délky jako funkce vstřikovacího proudu může být vyjádřen následující rovnicí [22]:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial I} = \frac{\partial \lambda}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial I} \quad (1)$$

Teplotní výkyvy lze odhadnout z nestability elektrického výkonu P_{diss} a teplotního odporu laserové diody R_T [22].

$$\frac{\partial T}{\partial I} = R_T \cdot \frac{\partial P_{diss}}{\partial I} \quad (2)$$

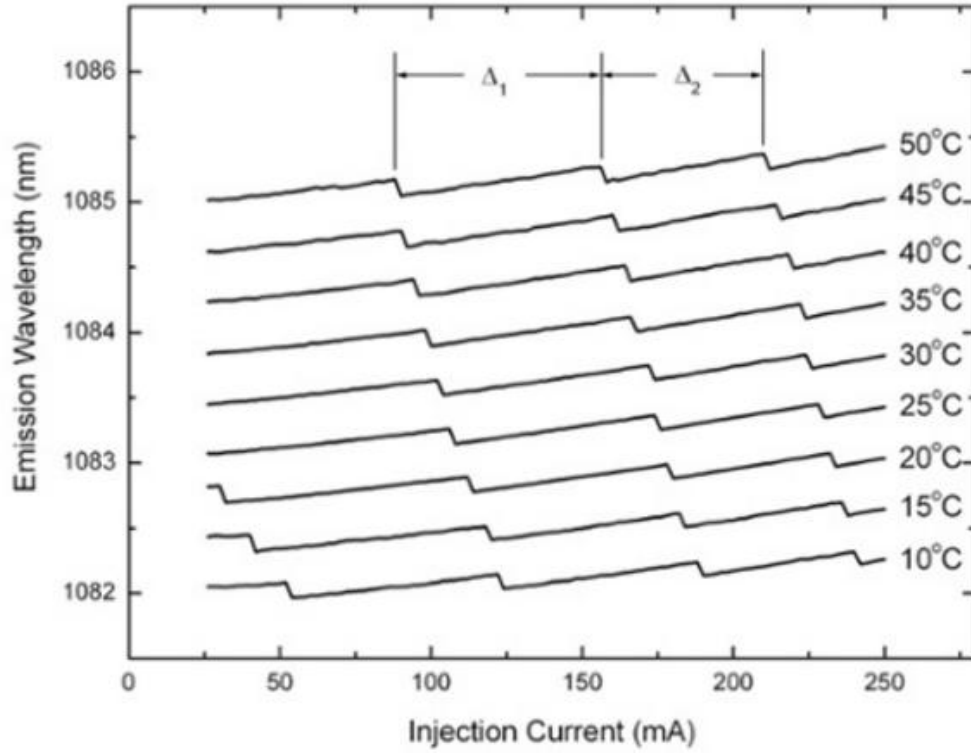
Změna vlnové délky vlivem změny napájecího proudu může být určena taktéž i vzorcem, který je vztažen k efektivnímu indexu lomu vnitřních materiálových vrstev n_{eff} teplotnímu koeficientu α_T charakterizujícímu specifickou vnitřní strukturu laserové diody [22].

$$\frac{\partial \lambda}{\partial I} = \frac{\lambda}{n_{eff}} \cdot \alpha_T \cdot R_T \cdot \frac{\partial P_{diss}}{\partial I} \quad (3)$$

Laserová dioda se může nacházet v různých režimech. Jedním z těchto režimů charakteristických pro DBR diody je tzv. režim Mode-Hop-Free. Tento režim je definován jako minimální změna hodnoty požadovaného proudu ΔI_m nutného k posunutí vlnové délky definované efektivní hodnotou délky dutiny laserové diody (rov. 4). Lze použít i explicitní vyjádření (rov. 5), kde L_g značí délku části zesílení a $L_{DBR,eff}$ účinnou délku DBR podle druhu materiálu. Chování laserové diody v tomto režimu pro jednotlivé nastavené teploty je možné vypočítat na obr. 7 [22].

$$\Delta I_m = \frac{\delta \lambda}{\partial \lambda / \partial I} \quad (4)$$

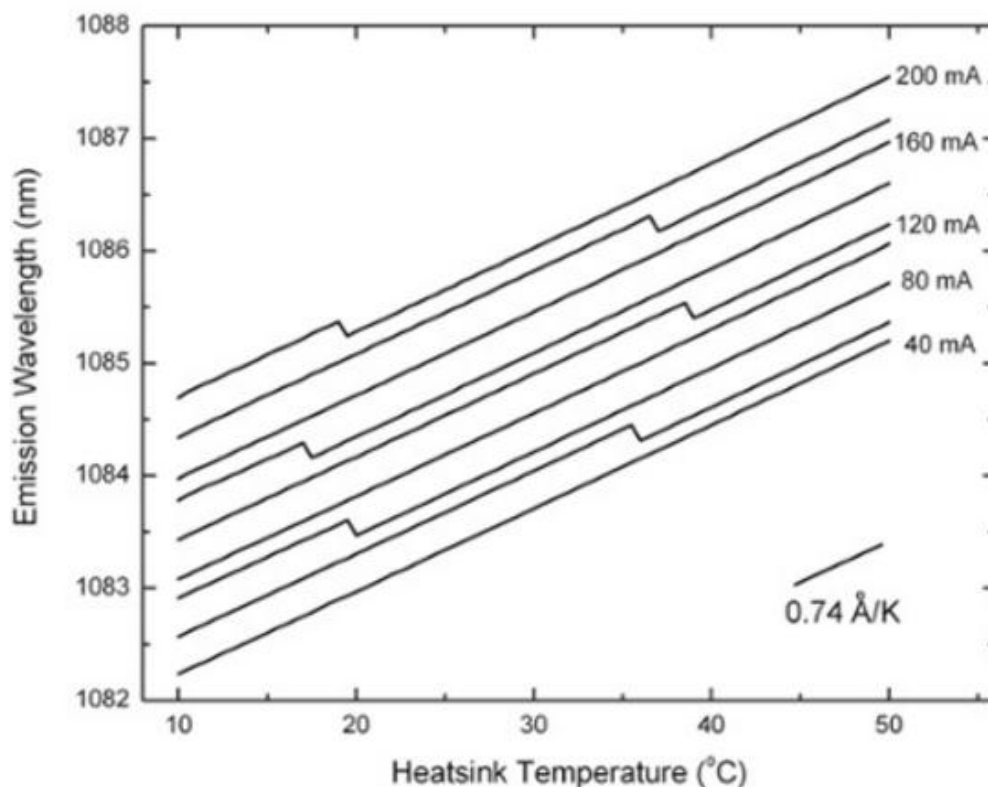
$$\Delta I_m = \frac{\lambda}{2(L_g + L_{DBR,eff}) \cdot \alpha_T \cdot R_T \cdot \frac{\partial P_{diss}}{\partial I}} \quad (5)$$



Obr. 7: DBR dioda - režim HOP-FREE při změně napájecího proudu [22]

Obdobně lze určit vztah pro změnu vlnové délky při změně teploty čipu (rov. 6). Tento jev je znázorněn na obr. 8 [22].

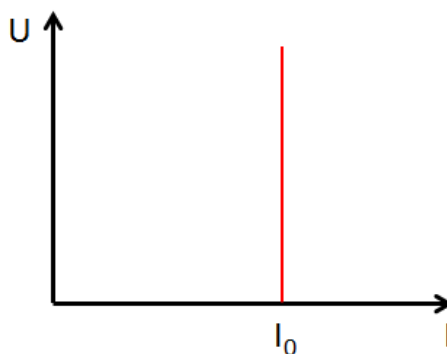
$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\lambda}{n_{eff}} \cdot \alpha_T \left(1 + R_T \cdot \frac{\partial P_{diss}}{\partial T} \right) \quad (6)$$



Obr. 8: DBR dioda - režim HOP-FREE při změně teploty čipu [22]

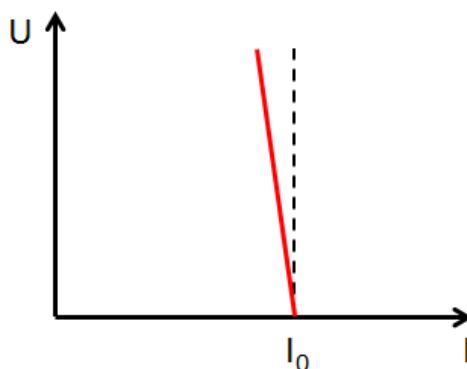
1.4 Proudové zdroje pro laserové diody

Ideálním zdrojem proudu je zdroj, který nemá žádné parazitní vlastnosti a není ovlivnitelný okolními vlivy, nemá žádnou teplotní závislost proudu a žádné kmitočtové závislosti. Vnitřní odpor ideálního zdroje proudu je nekonečný, takže výstupní proud zdroje není závislý na zátěži (obr. 9). Pokud se změní odpor zátěže R , změní se tím i hodnota svorkového napětí U , ale velikost proudu I zůstává stejná [13].

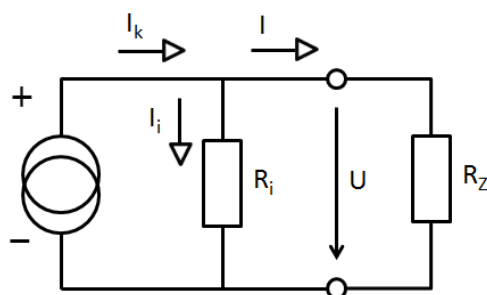


Obr. 9: Ideální zdroj proudu - závislost napětí na proudu

V případě, kdy se změnou odporu zátěže R se změní hodnota svorkového napětí U a málo i hodnota proudu I , tak pak se takový zdroj nazývá reálný zdroj proudu (obr. 10) [13].



Obr. 10: Reálný zdroj proudu - závislost napětí na proudu



Obr. 11: Reálný zdroj proudu - náhradní schéma

Skutečný zdroj (obr. 11) proudu má určitou hodnotu zkratového proudu I_K , který se v následujícím uzlu dělí na proud I_i , který teče směrem do zátěže, a proud I (rov. 7), který protéká vnitřním odporem. Zdroj proudu dodává maximální proud I , když je odpor zátěže R_Z řádově menší než vnitřní odpor zdroje R_i [13].

$$I = I_K - \frac{U}{R_i} \quad (7)$$

Zdroje proudu mají menší oblast použití než zdroje napětí, ovšem je výhodné je používat zejména v oblasti měřicí techniky, převodníků A/D a D/A, operačních a diferenčních zesilovačů. Dnes jsou již velice často používaná integrovaná provedení těchto zdrojů [13].

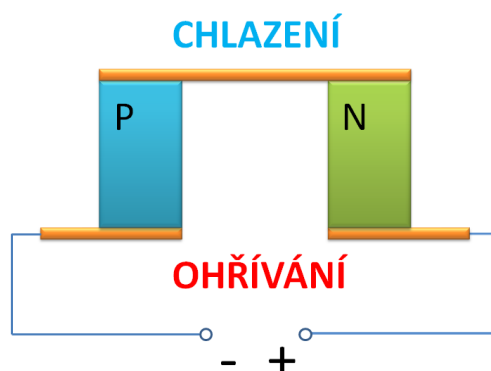
Výběr proudového zdroje pro laserovou diodu záleží na vybrané diodě a zejména její aplikaci. Někdy lze pořídit velice levný zdroj pro diodu připojitelný na síťové napětí 230 V. Pro jiné aplikace je nutné, aby byl proudový zdroj co nejvíce stabilní, a to už vyžaduje složitější a dražší řízení, resp. napájení diody.

1.5 Peltierův článek

Funkce tohoto článku je založena na Peltierově jevu. Peltierův jev popisuje přímou přeměnu elektrické energie na tepelnou a naopak. Protékáním stejnosměrného proudu místem

styku dvou různých vodičů dochází k uvolňování či pohlcování tepla, které je úměrné tomuto proudu. Směr proudu určuje, zda je v daném styku dvou vodičů teplo pohlcováno nebo uvolňováno [24].

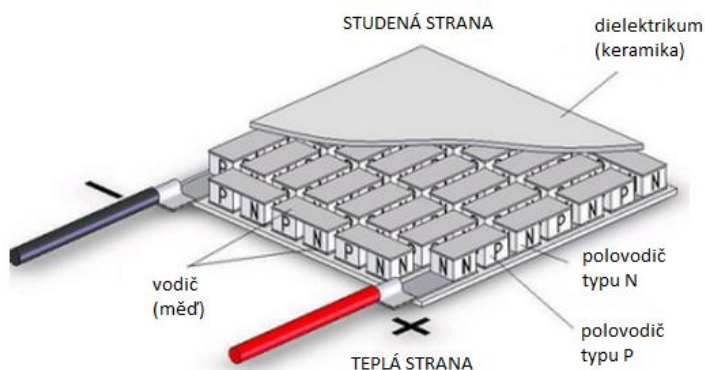
Peltierův článek (obr. 12) je složen ze dvou polovodičových sloupků typu P a typu N, které jsou na jedné straně propojeny měděnou spojkou. Přes spodní plošky článku se přivádí elektrická energie. Měděná spojka a měděné kontaktní plošky absorbují nebo vyzařují teplo. Jedna z ploch se ochlazuje a druhá ohřívá [24].



Obr. 12: Peltierův článek

Mezi polovodičem a měděnou spojkou vzniká přechodový odpor, který je nežádoucí. Tento odpor má vliv na rozdíl teplot mezi chladnou a ohřátou plochou. Množství absorbovaného tepla na studené straně a množství vyzařeného tepla na teplé straně Peltierova článku je určeno součinem tzv. Peltierova koeficientu a stejnosměrného proudu procházejícího polovodičem [25].

Tyto články je řetěží do série (běžně 72 článků). Jsou propojeny měděnými spojkami. Takovýmto sériím říkáme Peltierův modul nebo chladicí termobaterie (obr. 13) [25].



Obr. 13: Peltierův modul [23]

Každý polovodič modulu je nazýván elementem a v páru s druhým elementem tvoří termočlánek. K dosažení vyššího teplotního rozdílu mezi studenou stranou a teplou stranou se používá kaskádní zapojení, což je nazýváno jako vícestupňové moduly. Peltierův článek nemusí být využíván jen pro přenos tepelné energie při průchodu stejnosměrného elektrického proudu, ale lze jej používat i v opačném smyslu. Může být tedy použit jako zdroj elektrického napětí, přičemž jedna strana musí být ochlazována a druhá ohřívána [25].

1.6 Interference vlnění a interferometr

Pokud se prostorem současně šíří dvě nebo více optických vln, tak je výsledná vlnová funkce dána součtem jednotlivých vlnových funkcí $u(r,t)$, které jsou funkcí polohy $r = (x, y, z)$ a času t . Tento jev je nazýván princip superpozice a vychází z linearity vlnové rovnice (rov. 8) [18].

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (8)$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor (rov. 9) a c je rychlost světla v daném prostředí. Tato rychlost je definována jako podíl rychlosti světla ve vakuu c_0 a indexu lomu n [18].

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (9)$$

Princip superpozice v případě monochromatických vln o stejné frekvenci platí rovněž pro komplexní amplitudy $U(r)$ (rov. 10) [18].

$$U(r) = A(r)e^{j\varphi(r)} \quad (10)$$

Výsledkem skládání dvou monochromatických vln s komplexními amplitudami $U_1(r)$ a $U_2(r)$, které mají stejnou frekvenci, bude taktéž monochromatická vlna s komplexní amplitudou $U(r)$ (rov. 11), která bude mít stejnou frekvenci jako optické vlny, z nichž vznikla [18].

$$U(r) = U_1(r) + U_2(r) = A_1(r)e^{j\varphi_1(r)} + A_2(r)e^{j\varphi_2(r)} \quad (11)$$

Princip superpozice nelze uplatnit pro optické intenzity, protože výsledná intenzita nemusí být součtem intenzit jednotlivých optických vln. Důvodem, proč nelze uplatnit princip superpozice, je právě optická interference. Intenzita jednotlivých monochromatických vln je určena rovnicemi (rov. 12, 13) [18].

$$I_1 = |U_1|^2 \quad (12)$$

$$I_2 = |U_2|^2 \quad (13)$$

Intenzita výsledné vlny je dána rovnicí (rov. 14). Na této rovnici je vidět, že výsledná intenzita nemusí být prostým součtem intenzit jednotlivých monochromatických vln, ale v rovnici se vyskytuje člen, který se vztahuje k interferenci vln. Interferencí světelného záření se rozumí skládání světla, nikoliv ovšem prosté sčítání [18].

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* U_2 + U_1 U_2^* \quad (14)$$

Pro získání interferenční rovnice (rov. 17) je nutné dosadit explicitní vyjádření rovnic pro jednotlivé vlny (rov. 15, 16) do rovnice pro výpočet intenzity výsledné vlny (rov. 14) [18].

$$U_1 = \sqrt{I_1} e^{j\varphi_1}, \quad (15)$$

$$U_2 = \sqrt{I_2} e^{j\varphi_2}, \quad (16)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (17)$$

kde φ fázový rozdíl jednotlivých monochromatických vln. V případě $I_1 = I_2 = I_0$ a $\varphi = 0$ je výsledná intenzita rovna čtyřnásobku intenzit jednotlivých vln $I = 4I_0$. Pro $\varphi = \pi$ se intenzity obou vln navzájem vyruší a výsledná intenzita bude rovna nule. Příklad, kdy je výsledná intenzita pouhým součtem intenzit jednotlivých vln, nastává pro $\varphi = \pi/2$ a $\varphi = 3\pi/2$. Pak je výsledná intenzita rovna $I = 2I_0$ [18].

Optický přístroj, který využívá jevu interference optických vln se nazývá interferometr, pomocí kterého lze měřit např. malé vzdálenosti. Tyto přístroje se dělí do tří skupin. Dělí se na interferenční komparátory, interferenční refraktometry a interferenční spektroskopy. Interferenční komparátory jsou přístroje pro měření vzdáleností. Interferenční refraktometry jsou zařízení, podle nichž se určuje relativní změna světelné rychlosti, podle které se dají vypočítat indexy lomu plynů nebo kapalin. Třetími zařízeními jsou interferenční spektroskopy, pomocí kterých lze určit jemné struktury spektrálních čar. Interferometry se používají zejména pro měření s vysokým spektrálním rozlišením [9].

1.6.1 Proužková viditelnost

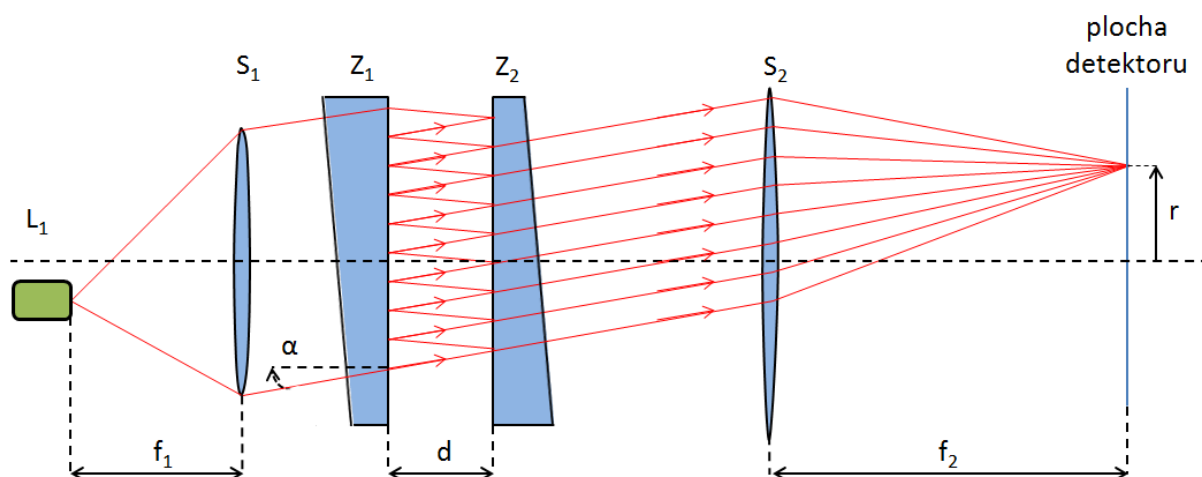
Proužková viditelnost η (rov. 18) je veličina, která popisuje kontrast interferenčních proužků. Kontrast je ovlivňován vzájemnými intenzitami jednotlivých laserových svazků a jejich polarizacemi. Hodnota proužkové viditelnosti se pohybuje v rozmezí od 0 do 1 [12].

$$\eta = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}} = \frac{2 \cdot E_{01} \cdot E_{02}}{E_{01}^2 + E_{02}^2} \cos \chi \quad (18)$$

Shodnou intenzitou obou laserových svazků ($E_{01} = E_{02}$) a jejich shodnou polarizací ($\chi = 0^\circ$), lze dosáhnout největšího kontrastu interferenčních proužků. Těmito podmínkami bude dosaženo toho, že intenzita tmavých proužků bude rovna nule. Pokud jsou laserové svazky příčně polarizované ($\chi = 90^\circ$), tak k interferenci laserových svazků nedochází [12].

1.6.2 Fabry-Perotův Interferometr

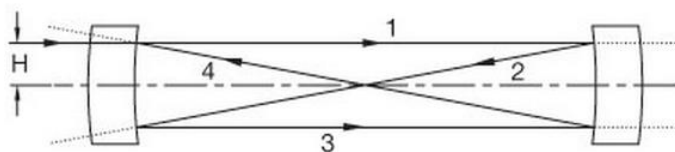
Fabry-Perotův interferometr (obr. 14) se skládá z dvojice rovinných planoparalelních zrcadel Z_1 a Z_2 neboli zrcadel, kde jsou obě jejich strany přesně rovinné a vzájemně rovnoběžné. Vzdálenost mezi zrcadly je proměnná a jsou odděleny vzduchovou mezerou. Materiálem, ze kterého jsou zrcadla vyrobena, je sklo. Jejich odrazné plochy jsou pokryty vysoce odrazným materiálem, obvykle se jedná o dielektrický film nebo tenkou vrstvu stříbra či hliníku. Kvůli potlačení několikanásobných odrazů je druhá strana vůči odrazné straně nakloněna o určitý úhel. Odrazné plochy zrcadel jsou umístěny naproti sobě. Vzdálenost d mezi nimi se pohybuje v řádu mikrometrů až centimetrů [7, 29, 30].



Obr. 14: Schéma Fabry-Perotova interferometru

Existuje také mechanické řešení, kde jsou obě zrcadla kulová a vzdálená od sebe na vzdálenost poloměru zakřivení obou zrcadel. Tento konstrukční režim je nazýván jako degenerovaný neboli konfokální konstrukce optické dutiny mezi zrcadly. Je označována jako degenerovaná, protože frekvence pro určité axiální a příčné režimy optické dutiny jsou stejné neboli degenerované. Kvůli této degeneraci není nutné navést optický svazek zcela přesně do dutiny Fabry-Perotova interferometru. Díky kulovým zrcadlům umožňuje snadnější zarovnání optického paprsku, protože konfokální interferometry jsou poměrně citlivé na úhlové zarovnání. Vnitřní konkávní povrch je vybaven vysoce reflexivní vrstvou a vnější konvexní povrch obsahuje antireflexní povlak. Při pohledu na obr. 15 je možné vidět trajektorii

vstupujícího vnějšího laserového paprsku, který vstupuje do kavity ve výšce H od osy této kavity. Paprsek jde po stopě 1, 2, 3 a 4, kde se odráží opět po stopě 1 [30].



Obr. 15: Kavita Fabry-Perotova interferometru [30]

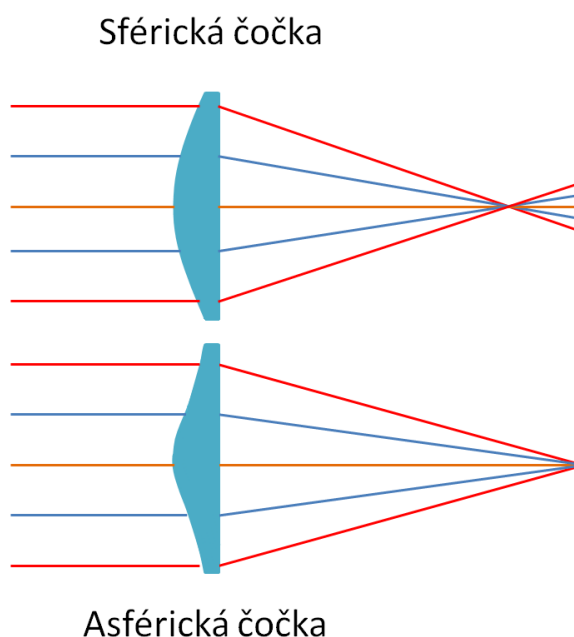
Účelem měření na Fabry-Perotově interferometru je dosažení maximální rezonance v dutině interferometru. Tohoto se dosáhne, pokud je celkové fázové zpoždění násobkem 2π . Celková délka optické dráhy paprsku (rov. 19) je závislá na H , tím pádem se bude stav rezonance lišit dle polohy vstupu paprsku do kavity [30].

$$L = 4R - H^4/r^3, \quad (19)$$

kde R je zrcadlová odrazivost a r je poloměr zakřivení zrcadel [30].

2 Měření kvality asférických optických ploch

Asférické plochy (obr. 16) jsou speciální variantou čoček sférických. Uprostřed jsou sférického charakteru, ovšem směrem do stran se zplošťují. Tento konstrukční rozdíl umožňuje vykreslit ostřejší obraz než čočky se sférickými plochami, protože asférické čočky zabraňují tzv. aberacím, neboli periferním zkreslením a dosažení stigmatického zobrazení tj. předmětový bod na optické ose se zobrazí ideálně do sdruženého obrazového bodu [5, 11].



Obr. 16: Zobrazení sférickou a asférickou čočkou

K dosažení stigmatického zobrazení je nutné vycházet z tzv. Fermatova principu, který definuje, že šíření světla z jednoho bodu do druhého bude uskutečněno po takové trajektorii, kterou bude světlo schopné urazit z prvního do druhého bodu za nejkratší čas. Zobrazení ideálního rozhraní asférické plochy (obr. 17) musí splňovat jednu podmínku (rov. 20) [11]:

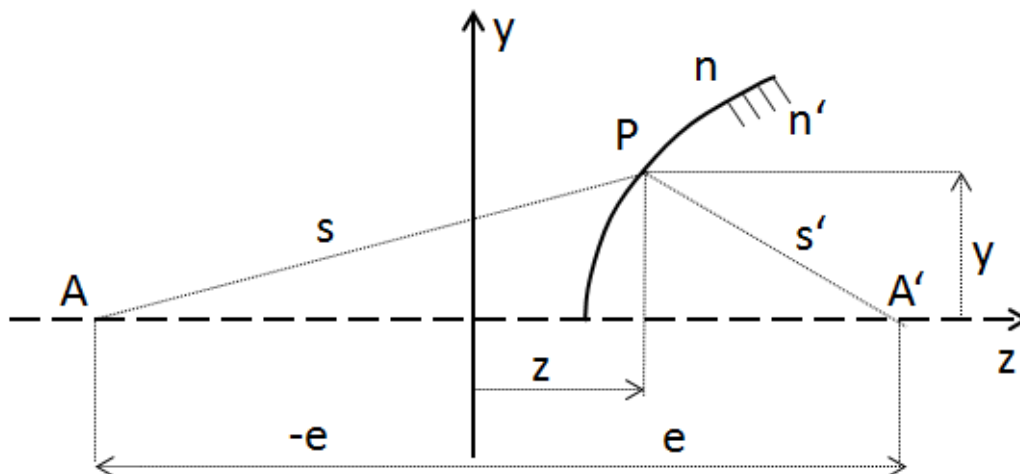
$$sn + s'n' = 2a = konst. \quad (20)$$

K získání rovnice plochy stigmatického zobrazení je nutné vyjádřit s a s' [11]:

$$n\sqrt{(z+e)^2 + y^2} + n'\sqrt{(e-z)^2 + y^2} = 2a \quad (21)$$

Následně upraveno na [11]:

$$\begin{aligned} & 16a^2n'^2[(e-z)^2 + y^2] \\ &= (4a^2 + n'^2[(e-z)^2 + y^2] - n^2[(z+e)^2 + y^2])^2 \end{aligned} \quad (22)$$



Obr. 17: Zobrazovací soustava rozhraní zobrazujícího stigmaticky z A do A'

Plochy popsané těmito rovnicemi jsou nazývány Descartovými plochami tzv. plochy 4. stupně. V praxi se častěji využívají degenerované plochy tj. plochy 2. stupně ačkoliv je možné vyrobit plochu 4. stupně. Aplikováním rovnosti $n' = -n$ dojde k degeneraci stigmatické plochy rozhraní (rov. 23) [11].

$$z^2(a^2n^2 - e^2n^4) + y^2a^2n^2 = a^2(a^2 - n^2e^2) \quad (23)$$

Po dosazení za $n = 1$ a $a > e$ lze získat rovnici elipsy ve středovém tvaru [11]:

$$\frac{z^2}{a^2} = \frac{y^2}{a^2 - e^2} = 1 \quad (24)$$

kde $e = \sqrt{a^2 - b^2}$ je poloviční vzdáleností mezi geometrickými ohnisky. Tato vzdálenost se nazývá excentricita neboli lineární výstřednost, a a b jsou velikosti poloos stigmatické plochy [11].

Pro $a < e$ lze získat rovnici hyperboly ve středovém tvaru [11]:

$$\frac{z^2}{a^2} = \frac{y^2}{e^2 - a^2} = 1 \quad (25)$$

Zde taktéž platí, že se jedná o geometrická ohniska nikoli optická. Excentricita hyperboly je dána vztahem $e = \sqrt{a^2 + b^2}$, kde a a b jsou rozměry poloos hyperboly [11].

Volbou $2a = 0$ lze dostat opět degenerovanou rovnici 2. řádu tvaru kružnice [11]:

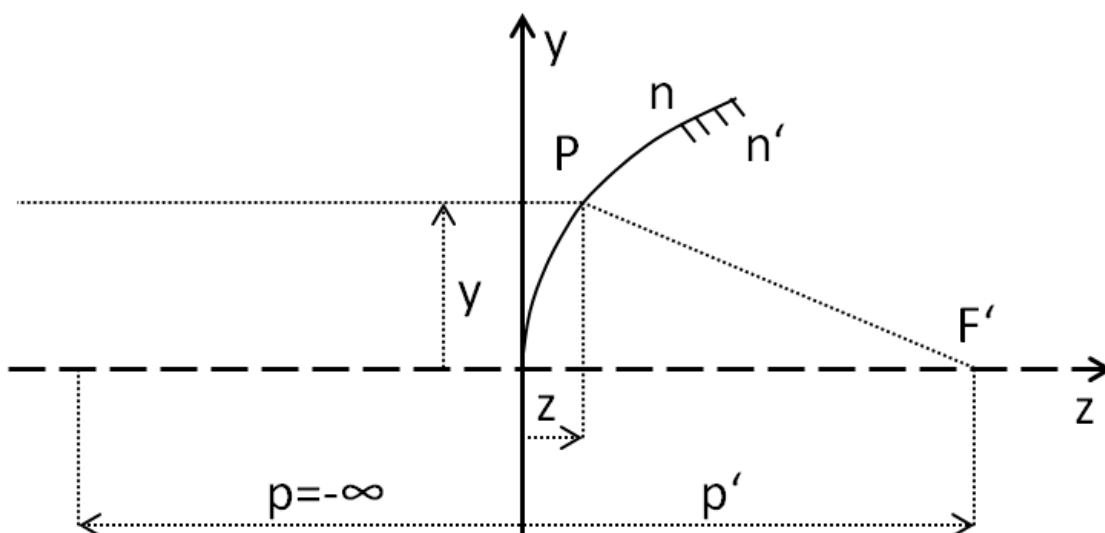
$$z^2 + y^2 + 2ze \frac{n^2 + n'^2}{n^2 - n'^2} + e = 0 \quad (26)$$

kde je kružnice posunuta od svého středu o $m = -e \frac{n^2 + n'^2}{n^2 - n'^2}$, přičemž poloměr křivosti této kružnice je dán vztahem $r^2 = m^2 - e^2$. Taktéž kulová plocha má sdružené body stigmatického zobrazení. Pro tyto sdružené body platí vztah mezi sečnými vzdálenostmi p a p' (rov. 27) [11].

$$p\ddot{n} = pn \quad (27)$$

Tyto stigmatické body se využívají k návrhu konstrukce aplanatických sférických čoček, ovšem tyto čočky je nutné doplnit o další optické prvky, protože tyto čočky neumožňují reálné zobrazení [11].

Další potřebnou variantou stigmatického zobrazení je zobrazení z nekonečna do bodu. Z obr. 18 je požadováno vyjádřit rovnici stigmatického rozhraní [11].



Obr. 18: Zobrazovací soustava rozhraní stigmaticky zobrazujícího z nekonečna do F'

$$p\ddot{n} = n'\sqrt{(p' - z)^2 + y^2} + nz \quad (28)$$

V případě $n < n'$ lze dosáhnout rovnice elipsy ve vrcholovém tvaru [11]:

$$\frac{\left(z - \frac{p'n'}{n' + n}\right)^2}{\left(\frac{p'n'}{n' + n}\right)^2} + \frac{y^2}{\frac{p'^2(n' - n)}{n' + n}} = 1 \quad (29)$$

kde pro její poloosy platí vzorce [11]:

$$a = \frac{p\ddot{n}}{n' + n} \quad (30)$$

$$b = p' \sqrt{\frac{n' - n}{n' + n}} \quad (31)$$

Záměnou indexu lomu $n > n'$ tj. před rozhraním a za rozhraním vyjde rovnice rozhraní ve tvaru hyperboly ve vrcholovém tvaru [11]:

$$\frac{\left(z - \frac{p'n'}{n' + n}\right)^2}{\left(\frac{p'n'}{n' + n}\right)^2} - \frac{y^2}{\frac{p'^2(n' - n)}{n' + n}} = 1 \quad (32)$$

Z výše uvedených vzorců je zřejmé, že ke konstrukci optických stigmaticky zobrazujících rozhraní se lze omezit pouze na plochy kuželoseček, z kterých pro výrobu asférických ploch jsou důležité zejména plochy rotačního hyperboloidu [11].

Využití asférických čoček je zejména v oborech fotografické, osvětlovací, laserové, infračervené nebo televizní techniky. Vlivem potřeby miniaturizace těchto zobrazovacích komponent bylo potřeba zajistit vyšší kvalitu asférického povrchu čočky [11].

Vlivem potřeby určení odchylky rozměrů povrchu vyrobené asférické čočky od požadovaného tvaru bylo potřeba najít metody k určení kvality těchto povrchů. Tyto metody se dělí na kontaktní a bezkontaktní. Vhodné je k určení věrohodnosti kvality zkoumaného asférického povrchu tyto metody kombinovat. Pro kontaktní metodu je používán tzv. sférometr [11].

Zajímavější kapitolou jsou metody bezkontaktní tj. pomocí laserového paprsku. Výhodou těchto bezkontaktních metod je měření kvality povrchu bez přímého kontaktu měřicího ústrojí s měřenou plochou. Nedojde tak například k poškození měřeného povrchu či zkreslení naměřených hodnot. Tyto metody je možné dělit na metody geometrické optiky, metody interferometrické a metody moiré [11].

2.1 Metody geometrické optiky

Metoda geometrické optiky vyžaduje použití tzv. profiloměru. Toto zařízení je v zásadě kolimátor usměrňující různoběžné paprsky na rovnoběžný laserový svazek, do kterého je vkládán měřený objekt. Profil měřeného objektu je pozorován pomocí objektivu a kamery a následně vyhodnocován počítačem. U těchto zařízení lze dosahovat rozlišení tvaru pod $1 \mu\text{m}$. Výhodou této metody je možnost sledování tvaru měřené plochy v celém řezu, ovšem tuto metodu nelze aplikovat na měření tvaru povrchu dutých ploch [11].

Další metodou je tzv. Hartmanova zkouška, kde je základním principem realizace úzkých paprsků procházejících optickou soustavou. Tyto paprsky jsou realizovány pomocí Hartmanovy clony s mnoha malými otvory. Po následném osvětlení rovnoběžným svazkem

paprsků je v obrazovém prostoru promítnuta množina stop, které jsou detekovány ve dvou rovinách posunutých o známou vzdálenost podél optické osy. Z obou těchto obrazů lze určit chod jednotlivých paprsků, polohu ohniska soustavy, tvar a deformaci měřené optické plochy [11].

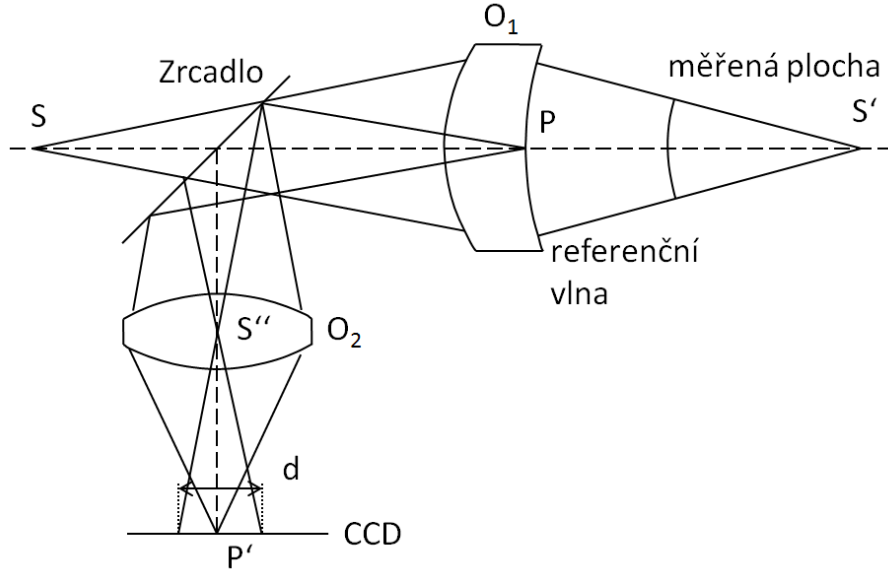
Jednou z možností je i použití paprskových metod, kde je měření realizováno pomocí laserového svazku a rozmítače. Rozmítaný paprsek utváří rastr měřené plochy a následně je snímána jeho odražená stopa na plošném fotodetektoru. Určením odchylek stopy od referenční pozice je možné tak dopočítat tvar a deformace měřené optické plochy [11].

Tyto geometrické bezkontaktní metody jsou užívány zejména jako verifikační k metodám interferenčním, které dosahují mnohem vyšších přesností.

2.2 Interferenční metody

Měřicí metody kvality optických povrchů založené na dvousvazkové interferometrii jsou jedny z nejpřesnějších bezkontaktních metod. Tyto metody dosahují velmi velké přesnosti od $\lambda/20$ až po $\lambda/100$, což vyhovuje většině požadavků pro měření sférických a asférických optických ploch [11].

Měřicí aparát lze realizovat pomocí interferometrů s vhodně zvolenou konstrukcí tj. Fizeaův interferometr (obr. 19) nebo Twyman-Greenův interferometr. Vlivem technického rozvoje CCD senzorů a piezoelektrických posuvů je možné automaticky pomocí těchto interferometrů vyhodnocovat tvar asférických ploch a jejich výrobních odchylek. Použitím vhodně zvolených algoritmů, které umožňují určit fázi měřeného vlnového pole na základě měření intenzity interferenčního pole způsobeného interferencí měřeného vlnového pole s referenčním vlnovým polem [11].



Obr. 19: Schéma Fizeauova interferometru

Základní myšlenkou těchto bezkontaktních metod je transformace referenční vlnoplochy (rovinné nebo sférické) na asférickou vlnoplochu, která by měla být v místě měřené asférické plochy tvarově stejná jako požadovaná asférická plocha. Pokud bude mít měřená asférická plocha stejný tvar s plochou požadovanou, tak bude mít vlnoplocha odražená od té měřené plochy stejný tvar. Liší-li se měřená asférická plocha od plochy referenční, tak dojde k deformaci odražené vlnoplochy a bude tedy odlišná od referenční vlnoplochy. Interferencí těchto dvou vlnoploch lze určit z interferenčního pole hodnoty odchylek měřeného povrchu od požadovaného povrchu [11].

Interferenci dvou polí, které jsou koherentní, monochromatické a lineárně polarizované, s komplexními amplitudami U_0 a U_R lze popsat interferenční rovnicí (rov. 35):

$$U_0 = A_0 e^{i\varphi_0} \quad (33)$$

$$U_R = A_R e^{i\varphi_R} \quad (34)$$

$$I = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos(\varphi_R - \varphi_0) = A + B \cos \varphi \quad (35)$$

kde A je amplituda a φ je fáze mezi referenčním polem a měřeným polem [11].

Interferencí těchto dvou polí vznikne interferenční obrazec, kde se střídají světlé a tmavé interferenční proužky. Světlé proužky značí maxima intenzity a nacházejí se v místech, kde platí podmínka [11]:

$$\varphi_R - \varphi_0 = \pm 2n\pi, n = 0, 1, 2 \dots \quad (36)$$

Pro tmavé interferenční proužky, které představují minima intenzity platí podmínka:

$$\varphi_R - \varphi_0 = \pm (2n + 1)\pi, n = 0, 1, 2 \dots \quad (37)$$

Kontrast světlých a tmavých interferenčních proužků je dán rovnicí rov. 38 [11].

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (38)$$

Výsledné vyhodnocení interferenčního pole je prováděno pomocí určení fázového rozdílu mezi měřeným a referenčním polem v bodech inteferogramu $\varphi(x, y)$ tj. určení neznámých A, B a φ . Jelikož má rovnice (rov. 39) tři neznámé hodnoty, tak je nutné provést tři různá měření s rozdílným fázovým posuvem referenčního pole φ_R a následně vyřešit soustavu rovnic typu [11]:

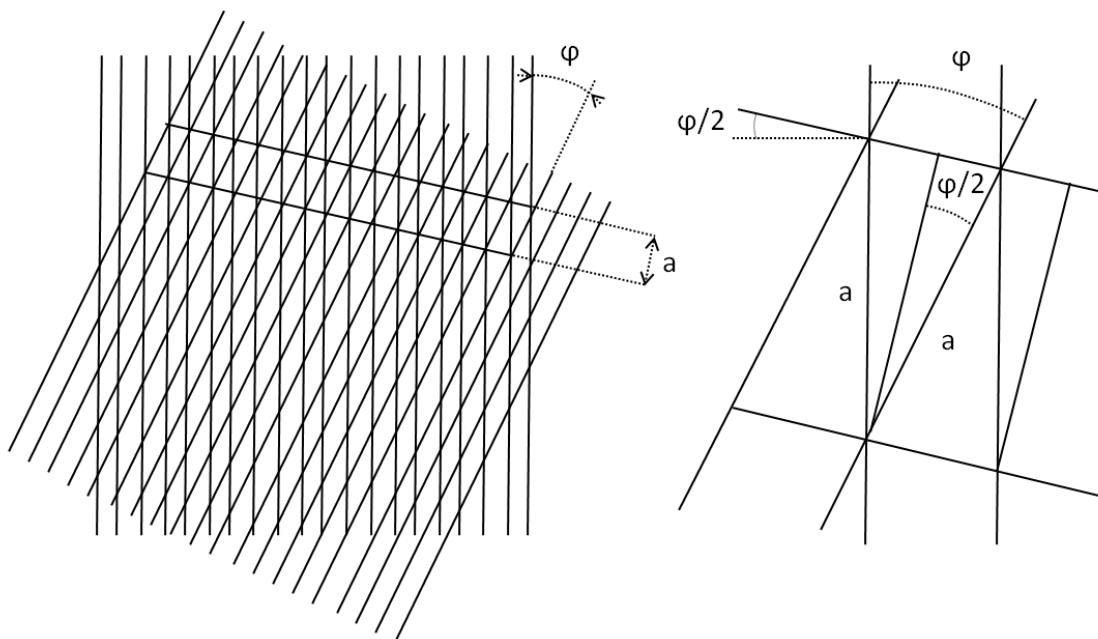
$$I_i = A + B \cos(\varphi - g_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (39)$$

Podle počtu měření je aplikována metoda x-krokových algoritmů pro vyhodnocení interferenčního pole. Nejvíce jsou používány tříkrokové a pětikrokové algoritmy. Z informace vzájemného fázového posunutí interferujících vlnových polí je možné určit jejich dráhový rozdíl (rov. 40) a tím i tedy velikost deformačních odchylek. Vlnová délka λ představuje vlnovou délku zdroje záření a δ je hodnota fázového posunutí vůči zvolenému počátku souřadnic [11].

$$W(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} [\varphi(x, y) - \delta] \quad (40)$$

Výhodou interferenčních metod je, že dávají informaci o kvalitě celé vyráběné plochy najednou. Tato měření nejsou prováděna ve viditelné části optického spektra, ale využívá se interference v oblasti IR záření tj. například na vlnové délce CO_2 laseru $10,6 \mu m$ [11].

V případě, že není možné pozorovat interferenční proužky vlivem velké úrovně gradientu měřeného povrchu, lze aplikovat metodu moiré interference. Principem této techniky je překrývání dvou rastrů za vzniku interferenčních proužků (obr. 20) a tím i zviditelnění jejich rozdílu [11].



Obr. 20: Vznik moiré interference vlivem natočení dvou rastrů

Rozteč mezi vzniklými interferenčními moiré proužky t_m pro konstantní rozteč obou rastrů t a úhlem natočení φ je dána vztahem [11]:

$$t_m = \frac{t}{2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad (41)$$

Pro úhel natočení $\varphi = (0^\circ, 60^\circ)$ bude rozteč moiré proužků vždy větší než je rozteč proužků původního rastru. Takto lze zviditelnit interferenční proužky i velmi gradientního interferenčního pole [11].

3 Přehled komerčních zdrojů

V této kapitole je uveden výčet komerčně prodávaných proudových zdrojů s teplotní regulací a jejich katalogových údajů. Tento seznam byl vytvořen pro porovnání vlastností zdrojů Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C s dosud neověřenými komerčními zdroji.

	Arroyo 6305	Thorlabs TED200C + LDC205C	LDC501	QCL500	PRO800 + ITC8022DS15
LD					
proudový rozsah [mA]	0 : ±500	0 : ±500	0 : ±500	0 : ±500	0 : ±200
max. rozlišení [μA]	20	10	10	10	6
přesnost nastavení [mA]	± 0,25	± 0,5	± 0,1	± 0,5	± 0,1
šum bez zvlnění [μA rms]	< 1,5	< 3	< 4,5	< 1,3	< 2
teplotní koeficient [ppm/°C]	50	50	10	10	50
TEC					
teplotní rozsah [°C]	10 : 40	0 : 40	0 : 40	0 : 50	0 : 40
přesnost měření [°C]	± 0,5	± 0,1	± 0,01	± 0,1	± 0,1
max. rozlišení [°C]	0,01	0,01	0,001	0,01	0,0015

Tab. 1: Porovnání komerčních zdrojů

V tabulce (tab. 1) je možné velice snadno porovnat základní katalogové údaje komerčních napájecích zdrojů. Všechny zdroje nabízejí poměrně široký proudový rozsah. Jedním ze zásadních kritérií napájecího zdroje pro laserové diody je teplotní koeficient, který určuje závislost stability proudu při změně teploty.

Teplotní rozsahy těchto zdrojů k napájení laserových diod jsou dostačující. Teplota čipu laserové diody je přepočítávána z napětí termistoru, který tuto teplotu měří, proto se katalogové hodnoty přesnosti měření teploty musí brát spíše orientačně, protože záleží na přesnosti odměřování teploty termistorem.

Nejvhodnějším zdrojem z pohledu katalogových údajů je zdroj PRO800 v kombinaci s modulem ITC8022DS15.

4 Požadované parametry proudového zdroje PLCS 100

Požadavkem Regionálního Centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC bylo navrhnout a vyrobit dva funkční modely nového proudového zdroje.

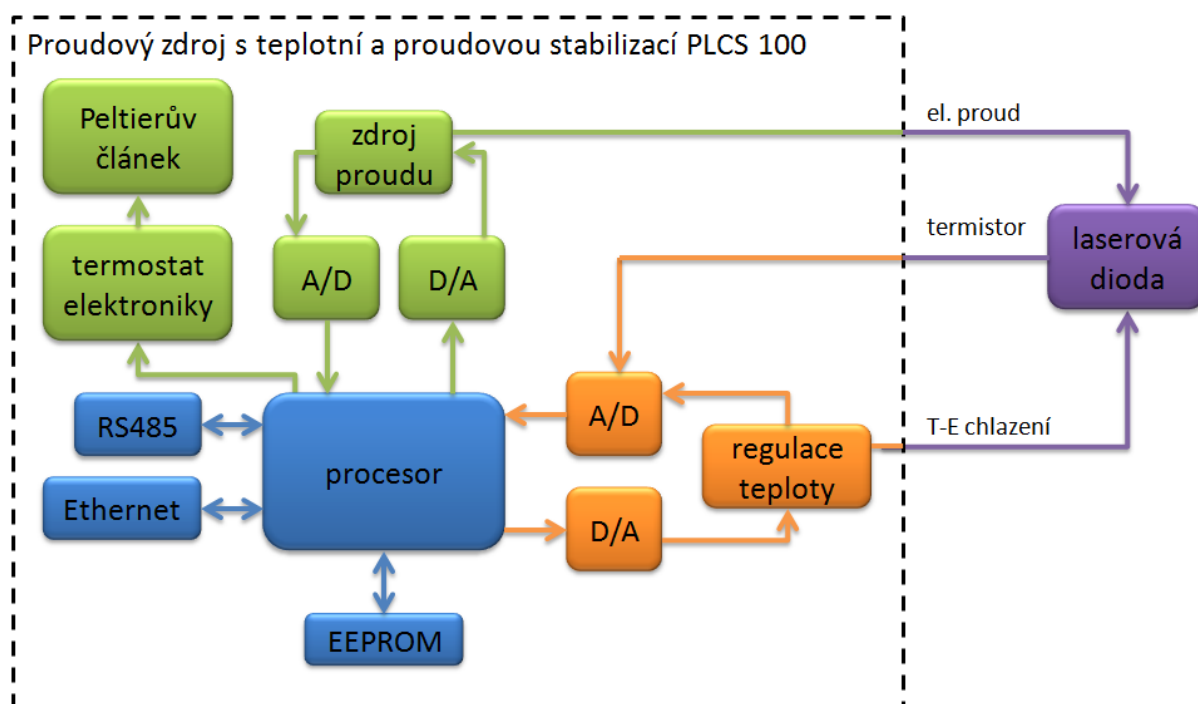
Mezi požadované vlastnosti nového proudového zdroje patří proudová stabilita $\pm 10 \mu\text{A}$ při proudu 100 mA s krokem nastavování 1 μA . Proudový rozsah zdroje byl nárokován na 50 - 100 mA. Dalšími požadavky byla stabilizace teploty s krokem 0,02 °C. Tato teplotní a proudová stabilita měla být dosažitelná nejméně po časový úsek 10 minut. Posledním požadavkem byla komunikace se vzdáleným zařízením pomocí USB nebo Ethernetu.

5 Návrh proudového zdroje s teplotní a proudovou stabilizací PLCS 100

V této kapitole je popsáno schéma a plošný spoj proudového zdroje s proudovou a teplotní stabilizací. Proudový zdroj byl navržen v prostředí Altium Designer.

5.1 Schéma proudového zdroje PLCS 100

Na obr. 21 je znázorněno blokové schéma proudové a teplotní stabilizace proudového zdroje připojeného na laserovou diodu. Toto propojení není přímé, ale laserová dioda je standardně upnuta v patici Arroyo 214, na kterou je připojen proudový zdroj pomocí dvou konektorů LD a TEC. Tato patice je určena přímo pro tento typ diodových pouzder. Přes konektor LD (Laser Diode connector) je do diody přiváděn proud ze zdroje a pomocí konektoru TEC (Thermo-Electric Cooler connector) je připojen termistor a termoelektrické chlazení laserové diody. Hlavním blokem tohoto schématu je procesor, který na základě informací přijatých od PC a z A/D převodníků nastavuje přes D/A převodníky požadované hodnoty elektrického proudu a teploty laserové diody. Informace o teplotě diody je získávána přímo z termistoru zabudovaném přímo v laserové diodě. Pokud má laserová dioda vyšší teplotu než je požadovaná hodnota, tak je dioda ochlazována pomocí interního chlazení přímo v diodě, pokud má dioda nižší teplotu než požadovanou, tak je naopak ohřívána.



Obr. 21: Blokové schéma proudového zdroje PLCS 100 zapojeného k laserové diodě

Podrobné schéma je uvedeno v příloze A nebo na přiloženém DVD-ROM.

5.2 Návrh spínaného zdroje pro PLCS100

Napájecí spínaný zdroj použitý v této práci je LT8610, jehož schéma je uvedeno na obr. 22. Tento zdroj má vstupní napětí konvertovat na výstupních +5 V. Spínaný zdroj byl navrhnout podle vzorového zapojení uvedeného v dokumentaci [15].

a) Volba spínací frekvence $f_{sw} = 750 \text{ kHz}$:

$$R_{64} = \frac{46,5}{f_{sw}} - 5,2 \quad (42)$$

$$R_{64} = \frac{46,5}{0,75} - 5,2 = 56,8 \text{ k}\Omega \quad (43)$$

Zvoleno $R_{64} = 56 \text{ k}\Omega$

$$f_{sw} = \frac{46,5}{R_{64} + 5,2} \quad (44)$$

$$f_{sw} = \frac{46,5}{56 + 5,2} = 0,7598 \text{ MHz} \quad (45)$$

b) Výpočet výstupního děliče:

$$U_{OUT} = 0,970 \cdot \left(\frac{R_{39}}{R_{87}} + 1 \right) \quad (46)$$

Zvoleno $R_{87} = 243 \text{ k}\Omega$.

$$R_{39} = R_{87} \cdot \left(\frac{U_{OUT}}{0,97} - 1 \right) \quad (47)$$

$$R_{39} = 243000 \cdot \left(\frac{5}{0,97} - 1 \right) = 1009577 \Omega \quad (48)$$

Přiřazeno z řady výrobních hodnot rezistorů: $R_{39} = 1 \text{ M}\Omega$.

Skutečné výstupní napětí:

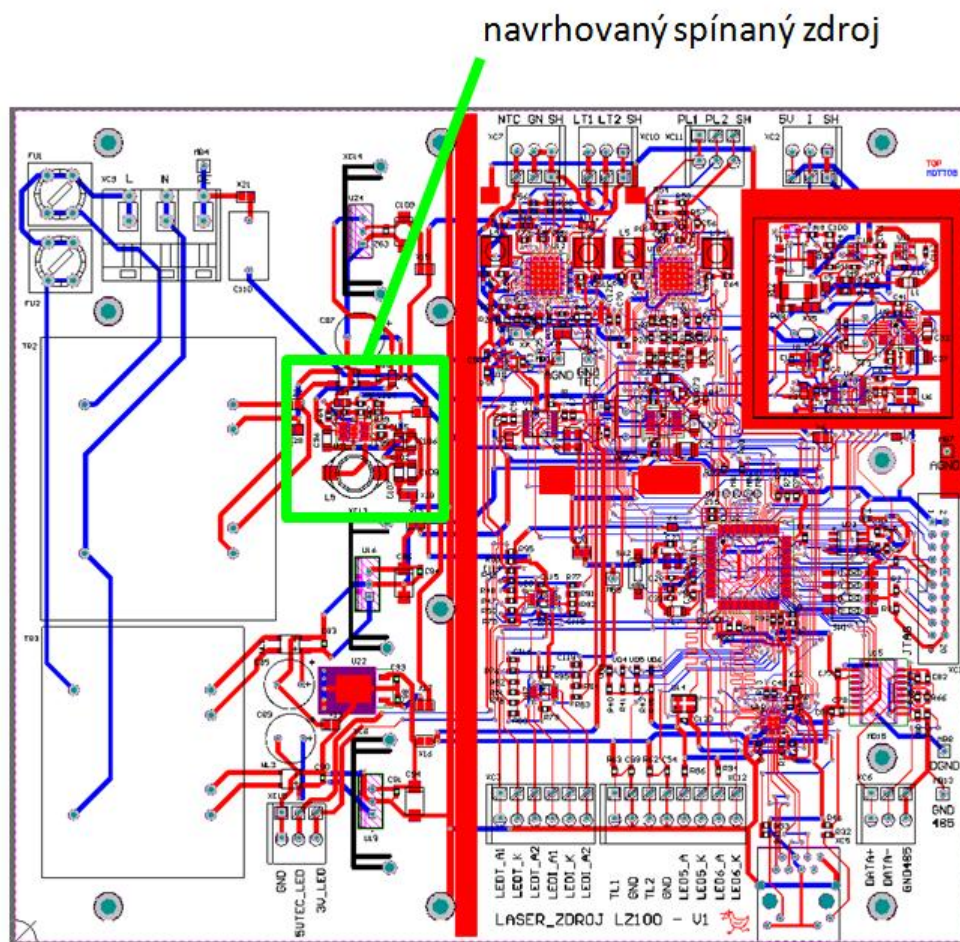
$$U_{OUT} = 0,970 \cdot \left(\frac{R_{39}}{R_{87}} + 1 \right) \quad (49)$$

$$U_{OUT} = 0,970 \cdot \left(\frac{1000000}{243000} + 1 \right) = 4,96 \text{ V} \quad (50)$$

Ostatní součástky byly použity ze vzorového zapojení uvedeného v dokumentaci LT8610 [15].

5.3 Proudový zdroj s teplotní regulací PLCS100

Plošný spoj navrhnutý v prostředí Altium Designer je vidět na obr. 22. Na plošném spoji lze vyzorovat, že napájecí část je oddělena od ostatních obvodů, aby nepřenášelo rušení do zbylé části plošného spoje. Součástí této práce bylo navrhnutí spínací napájecí zdroj s LT8610 (kap. 5.2).



Obr. 22: Plošný spoj proudového zdroje s teplotní stabilizací PLCS 100

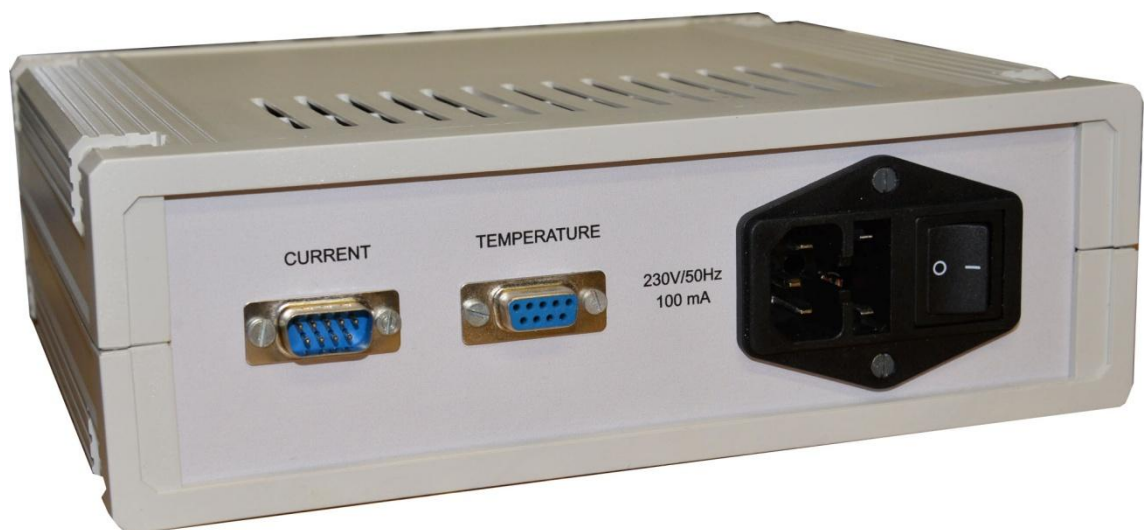
5.4 Návrh čelního a zadního panelu proudového zdroje PLCS 100

Čelní a zadní panel byl narýsován v prostředí CorelDRAW X7 dle rozmístění ovládacích prvků a použitých konektorů pro jednotlivá rozhraní. Navržené panely jsou uvedeny v příloze A.

Fotografie hotového funkčního modelu proudového zdroje s teplotní regulací je na obr. 23 a obr. 24.



Obr. 23: PLCS100 - pohled na přední panel



Obr. 24: PLCS100 - pohled na zadní panel

6 Měření vlastností dostupných komerčních zdrojů a nově vyvíjeného zdroje

Pro jednotlivá měření byla jako zdroj laserového záření zvolena laserová dioda QFBGLD-633-5 od firmy Qphotonics. Pouzdro této laserové diody zahrnuje snímací diodu (fotodiodu), která měří vlnovou délku laserové diody, termoelektrické chlazení a NTC termistor k měření aktuální teploty. Jmenovitá hodnota vlnové délky této diody je 633,3 nm, což je infračervená část spektra světelného záření. Více parametrů této diody při teplotě 25 °C je uvedeno v tabulce tab. 2. Teplota laserové diody, při které byla všechna měření prováděna, byla zvolena 16, 25 a 35 °C. Proudové byly zvoleny 80, 95 a 115 mA. Tyto hodnoty byly voleny po dohodě s konzultantem tak, aby bylo možné získat ucelené informace o vlastnostech laserové diody v dovolených proudových a teplotních intervalech udávaných výrobcem.

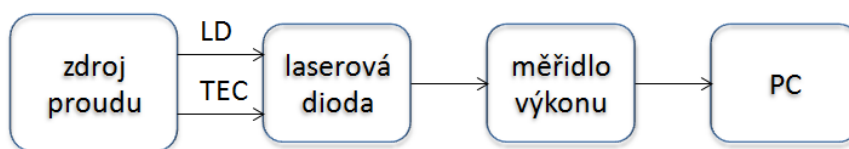
Tato laserová dioda byla jednotlivě napájena dostupnými proudovými zdroji a to Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C, ZLD100mA_TEC_v.1, který navrhl a postavil Ing. Jaroslav Novotný, a nově vyrobeným PLCS 100. Jako referenční zdroj laserového záření byl vybrán HeNe laser, jehož typická vlnová délka je 632,8 nm, což je červená část viditelného spektra.

Vlnová délka λ_c	633,3 +/- 0,005 nm
Šířka spektra $\Delta\lambda$	0,01 nm
Provozní napětí U	2,5 V
Odpor termistoru R	10 k Ω
Minimální teplota laserové diody T_{min}	0 °C
Maximální teplota laserové diody T_{max}	60 °C
Prahový proud v propustném směru I_{th}	69 mA
Maximální proud v propustném směru I_{Fmax}	154 mA
Maximální výkon P_{fmax}	5 mW

Tab. 2: Katalogové údaje laserové diody QFBGLD-633-5 při 25°C

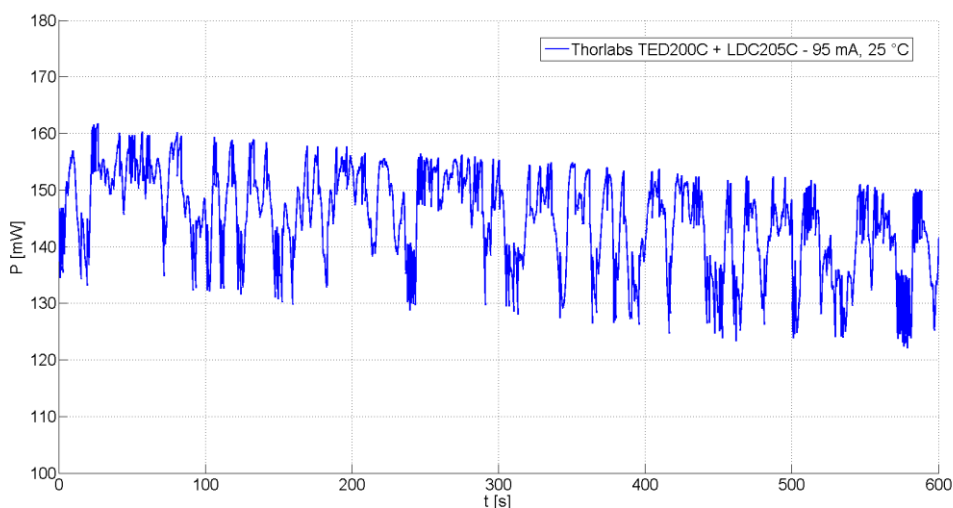
6.1 Měření optického výkonu

Blokové schéma pro měření výkonu je znázorněno na obr. 25. Teplota laserové diody QFBGLD-633-5 je regulována zdrojem přes rozhraní TEC na požadovaných 16 °C, 25 °C nebo 35 °C a proud je zase regulován přes rozhraní LD na požadovanou hodnotu. Optický výstup laserové diody byl přiveden přes optické vlákno na tenký fotodiodový výkonový senzor Thorlabs S130C. Informace z tohoto senzoru byla zpracovávána měřidlem výkonu Thorlabs PM100D, na jehož uživatelském rozhraní byla kvůli správné kalibraci měřidla nastavena jmenovitá hodnota vlnové délky měřeného zdroje optického záření. Toto měřidlo umožňovalo měřit vlnové délky v rozsahu 400 - 1100 nm. Měřidlo výkonu Thorlabs PM100D [38] bylo připojeno k PC, v němž byl instalován software pro zaznamenávání vývoje výkonu v čase. Podstatou tohoto měření je určit stabilitu optického výkonu, která by měla být zaručena po dobu 10 minut měření.

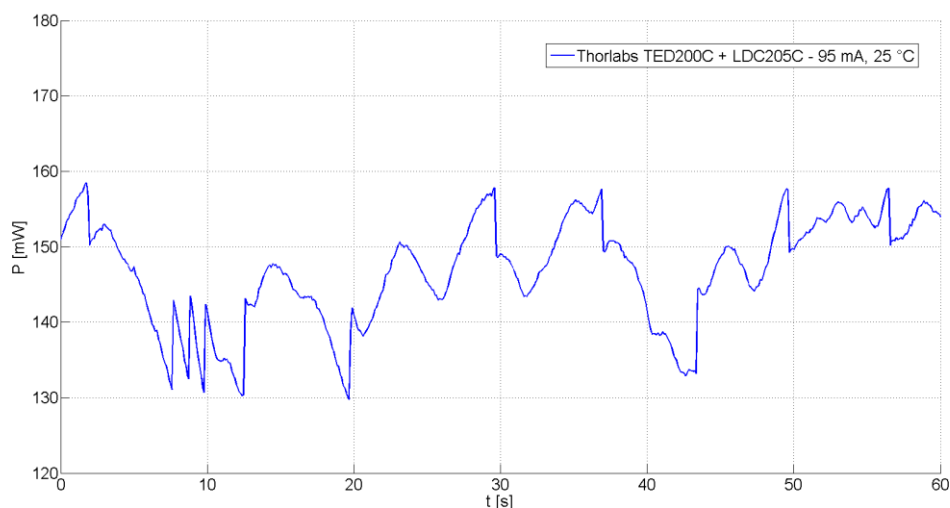


Obr. 25: Blokové schéma zapojení pro měření optického výkonu

6.1.1 Výsledky měření pro měření optického výkonu



Obr. 26: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 10 minut



Obr. 27: Detail časového vývoje optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 60 sekund

Zdroj	Maximum P [μW]	Minimum P [μW]	Rozdíl P [μW]
HeNe - 25 °C	235,15	230,62	4,53
Arroyo 6305 - 80 mA, 16 °C	157,62	137,50	20,11
Arroyo 6305 - 80 mA, 25 °C	98,55	65,15	33,40
Arroyo 6305 - 80 mA, 35 °C	59,47	14,16	45,32
Arroyo 6305 - 95 mA, 16 °C	323,28	299,51	23,77
Arroyo 6305 - 95 mA, 25 °C	161,78	122,11	39,67
Arroyo 6305 - 95 mA, 35 °C	54,06	11,77	42,29
Arroyo 6305 - 115 mA, 16 °C	460,16	380,36	79,81
Arroyo 6305 - 115 mA, 25 °C	296,81	271,12	25,68
Arroyo 6305 - 115 mA, 35 °C	113,91	84,67	29,24
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 16 °C	163,29	144,71	18,58
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 25 °C	95,43	63,87	31,56
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 35 °C	55,17	23,03	32,14
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 16 °C	347,01	305,24	41,77
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 25 °C	146,64	130,21	16,43
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 35 °C	46,86	13,80	33,05
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 16 °C	458,11	415,26	42,85
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 25 °C	297,33	261,21	36,11
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 35 °C	108,67	79,37	29,30
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 16 °C	214,09	149,71	64,39
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 25 °C	133,22	61,24	71,97
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 35 °C	62,85	13,89	48,95
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 16 °C	384,67	267,86	116,80
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 25 °C	202,61	111,62	90,98
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 35 °C	100,74	24,78	75,96
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 16 °C	478,40	378,93	99,47
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 25 °C	325,74	242,25	83,48
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 35 °C	129,12	61,97	67,15
PLCS 100 - 80 mA, 16 °C	207,13	126,45	80,68

PLCS 100 - 80 mA, 25 °C	99,16	47,66	51,49
PLCS 100 - 80 mA, 35 °C	79,69	24,80	54,89
PLCS 100 - 95 mA, 16 °C	348,75	242,91	105,84
PLCS 100 - 95 mA, 25 °C	165,83	84,59	81,24
PLCS 100 - 95 mA, 35 °C	84,72	27,14	57,58
PLCS 100 - 115 mA, 16 °C	497,26	419,88	77,39
PLCS 100 - 115 mA, 25 °C	371,36	245,69	125,66
PLCS 100 - 115 mA, 35 °C	134,76	44,66	90,09

Tab. 3: Optický výkon - minima, maxima a rozdíly výkonu

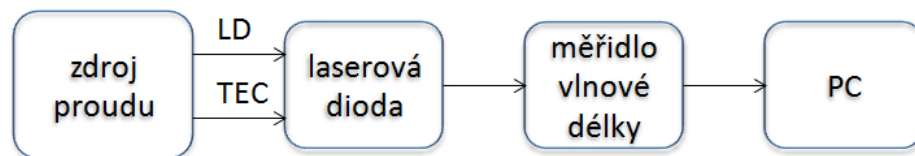
6.1.2 Vyhodnocení měření optického výkonu

Průběhy optického výkonu byly měřeny 10 minut po zapnutí napájení laserové diody, aby došlo k odeznění přechodových dějů a alespoň částečnému ustálení měřených průběhů. V kapitole kap. 6.1.1 je uveden graf pro představu časového vývoje optického výkonu obr. 26. Detailnější část tohoto průběhu je znázorněna na obr. 27. Z těchto grafů je patrné, že časový vývoj optického výkonu po dobu 10 minut měření se mění v určitém rozmezí. Krajiní hodnoty tohoto rozmezí pro jednotlivé napájecí zdroje a rozdíl mezi nimi jsou uvedeny v tabulce (tab. 3).

Z tabulkových hodnot (tab. 2) je vidět, že hodnota optického výkonu je určena hodnotou napájecího proudu a teplotou čipu diody (kap. 6). Největší stabilitu optického výkonu má laserová dioda při napájení zdrojem Thorlabs TED200C + LDC205C. Obdobných hodnot dosahuje i napájecí zdroj Arroyo 6305. Zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS100 vykazují výraznější nestabilitu v časovém rozmezí 10 minut. Závěrem k tomuto měření lze říci, že vhodnějšími zdroji pro laboratorní měření z těchto čtyř použitých zdrojů jsou Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C. Z těchto Detailní grafy všech jednotlivých průběhů jsou uvedeny na příloženém DVD-ROM.

6.2 Měření vlnové délky

Blokové schéma pro měření vlnové délky (obr. 28) je obdobné tomu pro měření výkonu s tím rozdílem, že optický výstup laserové diody QFBGLD-633-5 je přes antireflexní optické vlákno přiveden na měřidlo vlnové délky WS6-600 High-Precision Wavelength Meter od firmy HighFinesse [10]. Časový průběh vlnové délky je zaznamenáván v PC.



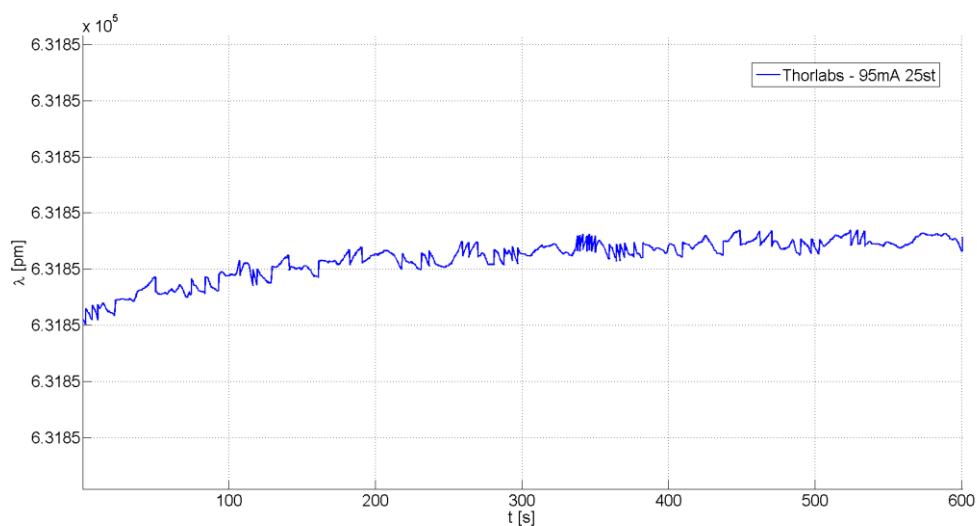
Obr. 28: Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky

6.2.1 Výsledky měření pro měření vlnové délky

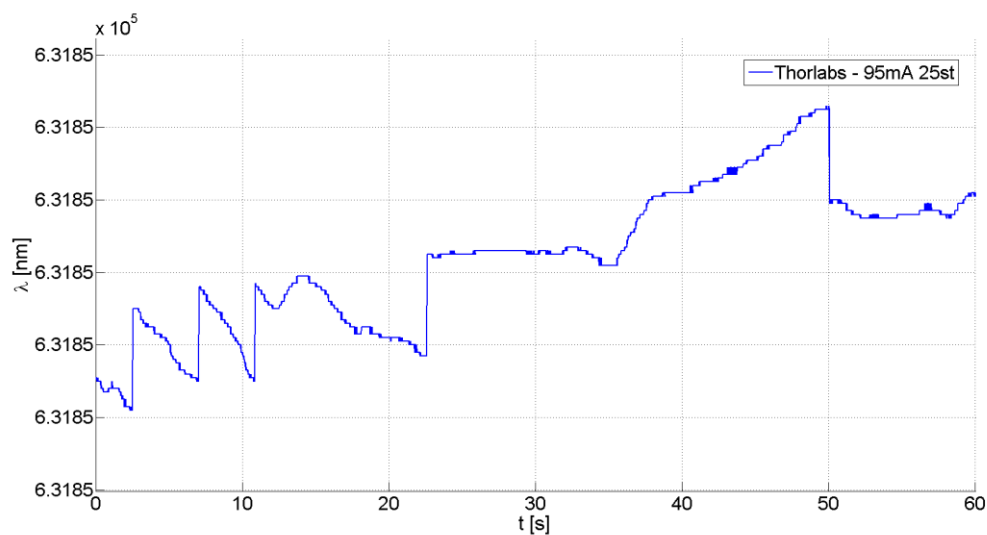
Zdroj	Maximum λ [nm]	Minimum λ [nm]	Rozdíl λ [pm]
HeNe - 25 °C	632,99174	632,99167	0,07
Arroyo 6305 - 80 mA, 16 °C	631,74329	631,74183	1,46
Arroyo 6305 - 80 mA, 25 °C	631,71354	631,71269	0,85
Arroyo 6305 - 80 mA, 35 °C	-	-	-
Arroyo 6305 - 95 mA, 16 °C	631,80380	631,80254	1,36
Arroyo 6305 - 95 mA, 25 °C	631,80862	631,80767	0,95
Arroyo 6305 - 95 mA, 35 °C	631,80839	631,80784	0,55
Arroyo 6305 - 115 mA, 16 °C	631,93664	631,93492	1,72
Arroyo 6305 - 115 mA, 25 °C	631,93632	631,93594	0,38
Arroyo 6305 - 115 mA, 35 °C	631,91654	631,91620	0,34
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 16 °C	631,75634	631,75563	0,74
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 25 °C	631,75820	631,75524	2,96
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 35 °C	-	-	-
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 16 °C	631,85073	631,85031	0,42
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 25 °C	631,85082	631,84902	1,80
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 35 °C	631,85660	631,85105	5,55
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 16 °C	631,93120	631,93093	0,27
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 25 °C	631,93202	631,92938	2,64
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 35 °C	631,93240	631,92811	4,29
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 16 °C	631,73068	631,67697	53,71
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 25 °C	631,73551	631,65347	82,04
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 35 °C	-	-	-
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 16 °C	631,84625	631,79932	46,93
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 25 °C	631,85224	631,78659	65,65
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 35 °C	631,85798	631,77386	84,12
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 16 °C	631,93437	631,88095	53,42
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 25 °C	631,93731	631,86991	67,40
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 35 °C	631,93977	631,89911	40,66
PLCS 100 - 80 mA, 16 °C	631,80643	630,61400	1192,43
PLCS 100 - 80 mA, 25 °C	632,49477	631,89987	594,90

PLCS 100 - 80 mA, 35 °C	-	-	-
PLCS 100 - 95 mA, 16 °C	634,43003	633,57422	855,81
PLCS 100 - 95 mA, 25 °C	632,48192	632,36101	120,91
PLCS 100 - 95 mA, 35 °C	633,90400	631,04736	2856,64
PLCS 100 - 115 mA, 16 °C	631,88196	630,81759	1064,37
PLCS 100 - 115 mA, 25 °C	632,70294	632,50032	202,62
PLCS 100 - 115 mA, 35 °C	634,28010	632,42665	1853,45

Tab. 4: Vlnová délka - minima, maxima a rozdíly vlnové délky



Obr. 29: Časový průběh vlnové délky laserové diody pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 10 minut



Obr. 30: Časový průběh vlnové délky laserové diody pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 95 mA a teplotě 25 °C po dobu 60 sekund

6.2.2 Doba ustálení vlnové délky laserové diody QFBGLD-633-5

V následující tabulce (tab. 5) jsou uvedeny doby ustálení průběhu vlnové délky laserové diody pro jednotlivé napájecí zdroje. Doby ustálení časového průběhu vlnové délky byly měřeny při napájecím proudu 95 mA a teplotě 25 °C.

<i>Napájecí zdroj</i>	<i>Doba ustálení vlnové délky [s]</i>
Arroyo 6305 - 95 mA, 25 °C	240
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 25 °C	220
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 25 °C	410
PLCS 100 - 95 mA, 25 °C	460

Tab. 5: Doba ustálení průběhu vlnové délky laserové diody QFBGLD-633-5 pro jednotlivé napájecí zdroje

Pro přesná laboratorní měření je vhodné používat diodu QFBGLD-633-5 po uplynutí doby ustálení vlnové délky laserové diody, jelikož by se mohly náměry pořízené v různých časech lišit.

6.2.3 Vyhodnocení měření vlnové délky

Měření vlnové délky bylo prováděno pomocí měřidla vlnové délky WS6 - 600 High-Precision Wavelength Meter, které měřilo vlnovou délku s přesností desetiny pikometru. Toto měření je nejdůležitější ze všech, protože při interferometrických měřeních je potřeba zejména stability vlnové délky. Požadavkem pro laboratorní měření povrchů asférických čoček byla stanovena stabilita vlnové délky minimálně po dobu 10 minut.

Z tohoto důvodu byly měřeny časové průběhy vlnové délky po dobu 10 minut. Tento průběh se v časovém horizontu vyvíjí v určitých mezích. Tyto krajní hodnoty průběhů a jejich rozdíl jsou uvedeny v tabulce (tab. 4). Z těchto hodnot lze na první pohled říci, že lepší stabilitu vlnové délky má plynňý HeNe laser oproti laserové diodě QFBGLD-633-5.

Laserová dioda byla napájena různými proudovými zdroji s teplotní regulací. Z těchto zdrojů z pohledu stability vlnové délky po dobu 10 minut vychází nejlépe napájecí zdroj Arroyo 6305. Laserová dioda v kombinaci s tímto zdrojem dosahuje v poměru k ostatním měřeným zdrojům velmi velké stability. Vlnová délka se při napájení tímto zdrojem mění v rozmezí 1,5 pm. Dalo by se říci, že rovnocenným zdrojem z pohledu stability vlnové délky je napájecí zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C. Tento zdroj dosahuje rozptylu vlnové délky 5,6 pm, což je celkem stabilní průběh vlnové délky. Při některých napájecích proudech a teplotách čipu dosahuje i srovnatelných stabilit vlnové délky v porovnání s Arroyo 6305.

Napájení laserové diody QFBGLD-633-5 zdrojem ZLD100mA_TEC_v.1 již není tak stabilní jako u zdrojů Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C. Hodnoty vlnové délky

se pro tento zdroj pohybují v rozmezí 40-85 pm. Takto velká nestabilita vlnové délky může být v mnoha laboratorních měřeních velice nežádoucí a znehodnocovat výsledky měření. U zdroje PLCS100 je očividné, že nezcela správně funguje teplotní regulace teploty čipu laserové diody, v důsledku toho dochází k hodně velkým výkyvům hodnot vlnové délky.

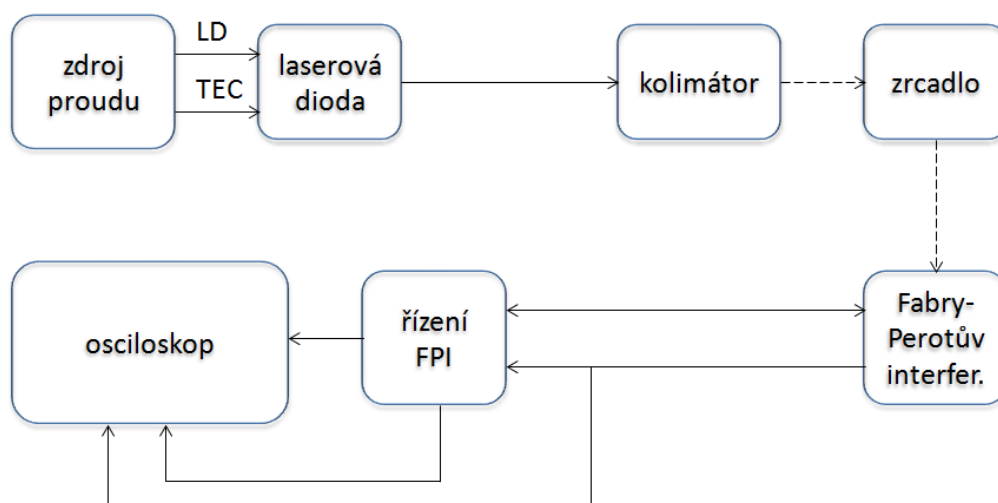
Doby ustálení průběhu vlnové délky laserové diody byly měřeny pouze pro napájecí proudy 95 mA a teploty čipu 25 °C, poněvadž se jednalo o poměrně časově náročná měření. Tyto doby jsou uvedeny v tabulce (tab. 5). Nejrychlejšího ustálení průběhu vlnové délky dosahuje dioda při napájení zdrojem Thorlabs TED200C + LDC205C a to po 220 sekundách. Podobné hodnoty doby ustálení dosahuje dioda i v kombinaci se zdrojem Arroyo 6305. O zhruba 200 sekund delší doby ustálení mají zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS100. Tudíž je nutné počkat delší čas než se dioda ustálí na stabilní hodnotu vlnové délky uvedené v tab. 4.

Průběhy pro proud 80 mA a teplotu 35 °C nebylo možné změřit, protože na detektor měřidla vlnové délky se nedostával potřebný optický výkon. Detailní grafy jednotlivých průběhů jsou uvedeny na příloženém DVD-ROM.

6.3 Měření na Fabry-Perotově interferometru

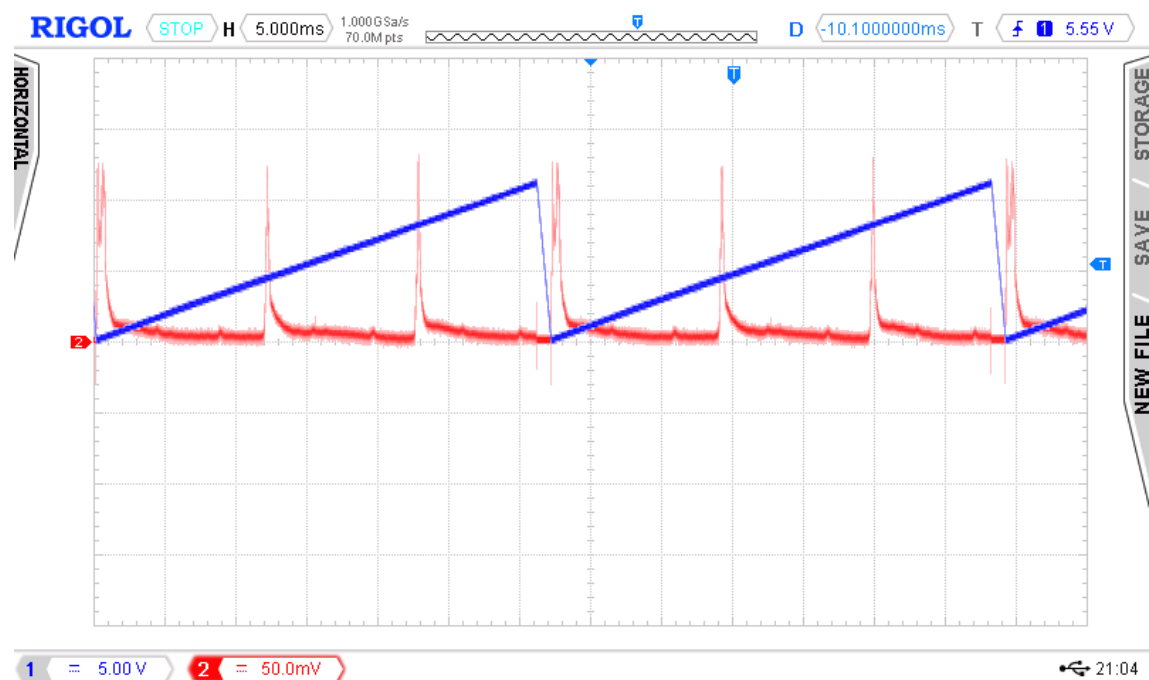
Měření na Fabry-Perotově interferometru popisuje schéma uvedené na obr. 31. Laserová dioda QFBGLD-633-5 je napájena jedním z měřených zdrojů. Paprsek vycházející z laserové diody je pomocí optického vlákna naveden do kolimátoru Thorlabs F810FC-543 [37] pro rozsah vlnových délek 350 - 700 nm, který z různoběžných paprsků udělá paprsky rovnoběžné. Laserový paprsek se tedy šíří v jednom směru a nerozbíhá se do okolí. Tento laserový svazek je naveden pomocí odrazu od zrcátka do Fabry-Perotova interferometru SA210-5B [40] s $FSR = 10$ GHz, jenž má v sobě zahrnutý fotodetektor a je schopen snímat laserový paprsek v rozsahu vlnových délek 535 - 820 nm [30].

Fabry-Perotův interferometr byl propojen s SA201 řízením FPI [39], což je speciálně navržený generátor pro Fabry-Perotův interferometr. Toto řízení FPI generuje vysoce stabilní rampu napětí s amplitudou 11,3 V [30].

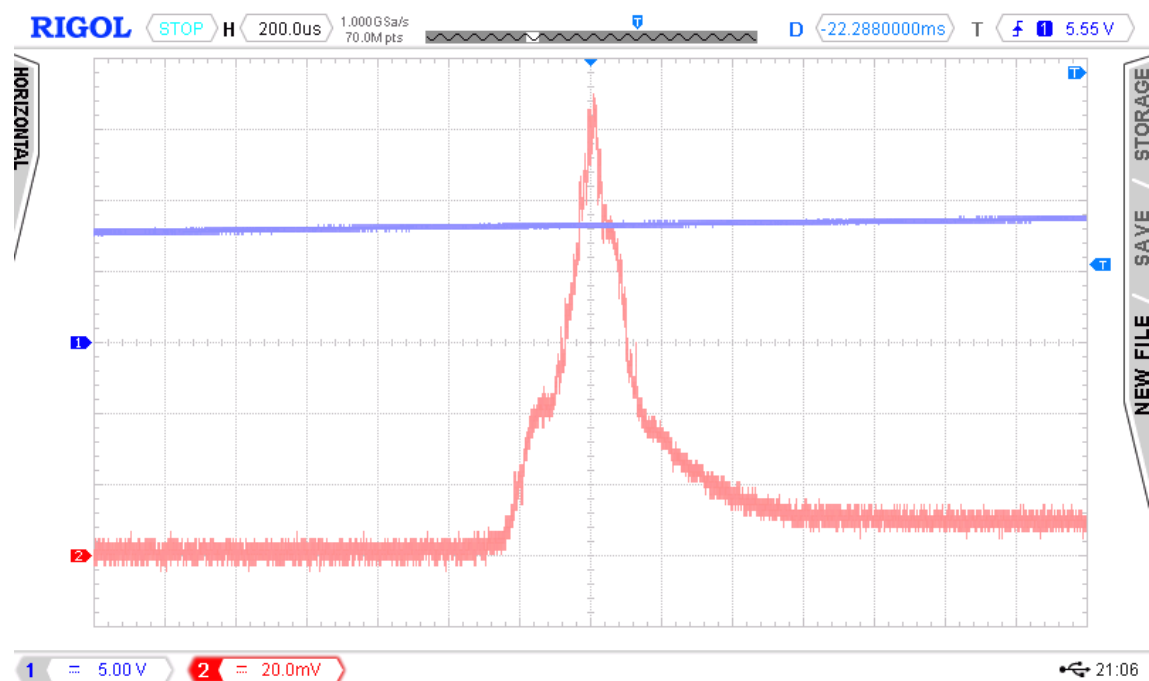


Obr. 31: Blokové schéma pro měření na Fabry-Perotově interferometru

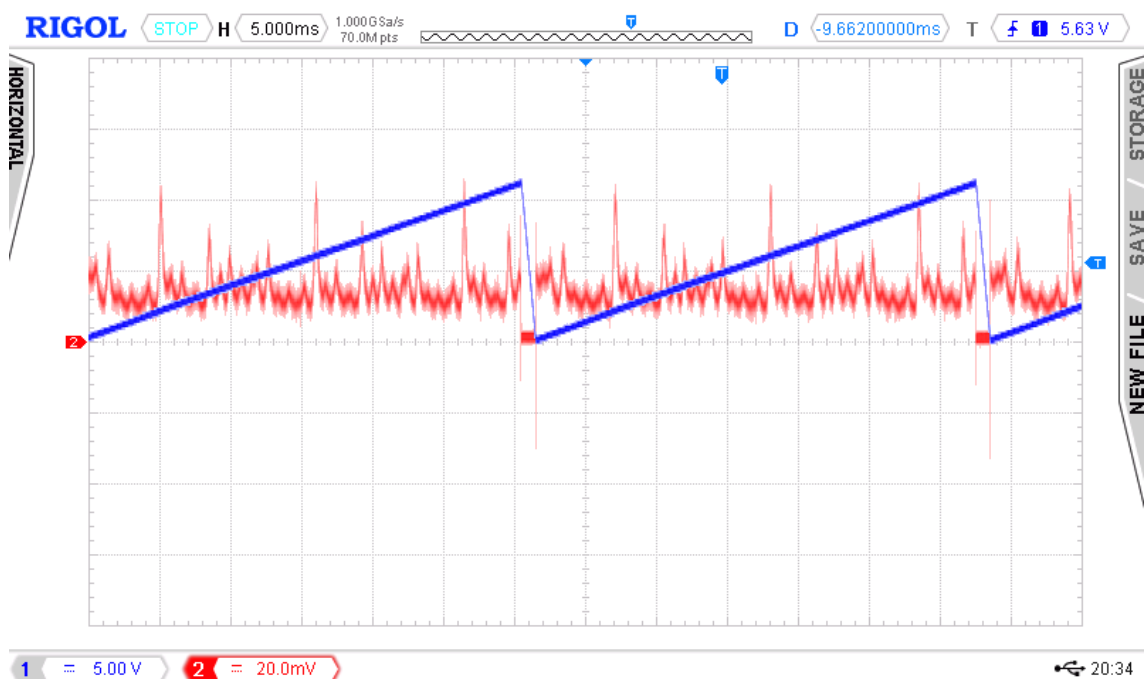
6.3.1 Výsledky měření pro měření na Fabry-Perotově interferometru



Obr. 32: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru pro zdroj PLCS 100 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C



Obr. 33: Detail rezonančního peaku pro zdroj PLCS 100 při proudu 95 mA a teplotě 25 °C



Obr. 34: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru s parazitními peaky pro zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C při proudu 115 mA a teplotě 25 °C

Tento signál rampy se používá ke snímání vzdálenosti mezi dvěma zrcadlyavity Fabry-Perotova interferometru. SA201 také obsahuje velice přesný zesilovač signálu z fotodetektoru. K vzniku peaků na druhém signálu, což je zesílený signál z fotodetektoru, dochází pouze v případě, pokud je délka dutiny mezi zrcadly v rezonanci s vlnovou délkou paprsku nebo jejími celočíselnými násobky. Měření bylo prováděno pomocí osciloskopu RIGOL DS4022 [26].

Celková jakost interferometru a záření F_t je definována jako poměr FSR (Free Spectral Range) ku $FWHM$ (rov. 51), což je šířka peaku v polovině jeho maxima. Vzdálenost mezi peaky je značena ΔT [30].

$$F_t = \frac{FSR}{FWHM} \quad (51)$$

Kalibrační konstanta c_1 byla vypočtena dle rovnice (rov. 52) a je definována jako podíl FSR ku vzdálenosti mezi peaky ΔT .

$$c_1 = \frac{FSR}{\Delta T} \quad (52)$$

<i>Zdroj</i>	<i>Výška peaku H_p [mV]</i>	<i>Šířka v půlce peaku FWHM [μs]</i>	<i>Jakost F_t [MHz/ms]</i>	<i>Vzdálenost mezi peaky ΔT [ms]</i>	<i>Kalibrační konstanta c_1 [MHz/ms]</i>	<i>Pohyb struktury Δz [μs]</i>
HeNe - 25 °C	26	220	45,5	10,6	943,4	0,4
Arroyo 6305 - 80 mA, 16 °C	182	316	31,6	10,6	943,4	0,6
Arroyo 6305 - 80 mA, 25 °C	22	262	38,2	10,6	943,4	0,4
Arroyo 6305 - 80 mA, 35 °C	18	184	54,3	10,6	943,4	0,9
Arroyo 6305 - 95 mA, 16 °C	115	224	44,6	10,6	943,4	0,7
Arroyo 6305 - 95 mA, 25 °C	90	120	83,3	10,6	943,4	0,4
Arroyo 6305 - 95 mA, 35 °C	43	102	98,0	10,6	943,4	0,8
Arroyo 6305 - 115 mA, 16 °C	104	282	35,5	10,6	943,4	0,9
Arroyo 6305 - 115 mA, 25 °C	48	176	56,8	10,6	943,4	1,2
Arroyo 6305 - 115 mA, 35 °C	23	188	53,2	10,6	943,4	1,4
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 16 °C	232	156	64,1	10,6	943,4	0,7
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 25 °C	22	132	75,8	10,6	943,4	0,9
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 35 °C	7	98	102,0	10,6	943,4	0,6
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 16 °C	118	208	48,1	10,6	943,4	1,4
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 25 °C	78	260	38,5	10,6	943,4	0,8
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 35 °C	42	124	80,6	10,6	943,4	1,2
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 16 °C	112	116	86,2	10,6	943,4	1,6
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 25 °C	45	132	75,8	10,6	943,4	1,6
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 35 °C	34	186	53,8	10,6	943,4	1,3

ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 16 °C	225	96	104,2	10,6	943,4	0,9
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 25 °C	22	184	54,3	10,6	943,4	1,2
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 35 °C	6	162	61,7	10,6	943,4	2,8
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 16 °C	85	180	55,6	10,6	943,4	1,4
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 25 °C	69	214	46,7	10,6	943,4	2,7
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 35 °C	41	138	72,5	10,6	943,4	2,3
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 16 °C	105	206	48,5	10,6	943,4	0,6
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 25 °C	48	294	34,0	10,6	943,4	2,1
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 35 °C	33	176	56,8	10,6	943,4	1,8
PLCS 100 - 80 mA, 16 °C	230	362	27,6	10,6	943,4	2,6
PLCS 100 - 80 mA, 25 °C	22	186	53,8	10,8	925,9	2,4
PLCS 100 - 80 mA, 35 °C	8	148	67,6	10,8	925,9	3,8
PLCS 100 - 95 mA, 16 °C	132	416	24,0	10,6	943,4	2,6
PLCS 100 - 95 mA, 25 °C	85	288	34,7	10,6	943,4	3,7
PLCS 100 - 95 mA, 35 °C	44	154	64,9	10,8	925,9	4,6
PLCS 100 - 115 mA, 16 °C	112	286	35,0	10,6	943,4	2,8
PLCS 100 - 115 mA, 25 °C	48	328	30,5	10,5	952,4	3,9
PLCS 100 - 115 mA, 35 °C	34	272	36,8	10,6	943,4	4,2

Tab. 6: Vyhodnocení průběhu z Fabry-Perotova interferometru

6.3.2 Vyhodnocení měření na Fabry-Perotově interferometru

V tab. 6 je možné vidět naměřené hodnoty pomocí kurzoru osciloskopu H_p , $FWHM$, ΔT a Δz . Z nich byly vypočtené hodnoty F_i a c_I . Zesílení fotodetektoru bylo nastaveno pro všechna měření na 1:1000000. Je zřejmé, že pro malé výkony laserové diody není možné odečtené hodnoty z obrazovky osciloskopu brát s velkou váhou, protože z průběhů nelze zcela přesně odečíst parametry peaků, k jejichž vzniku docházelo vlivem rezonance v dutině Fabry-Perotova interferometru.

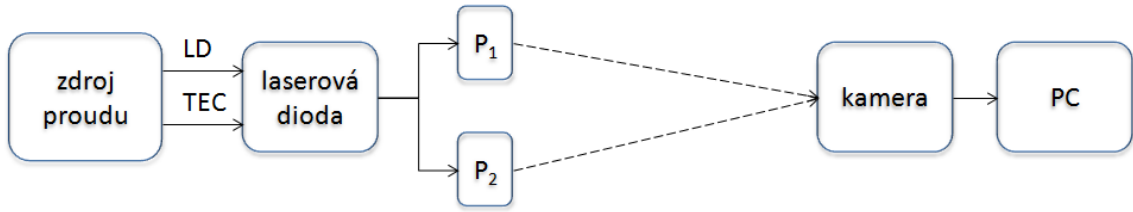
Parametr šířky peaku v jeho polovině $FWHM$ určuje celkovou jakost interferometru a i měřeného optického záření. Čím užší je peak, tím menší je $FWHM$ a tím pádem je vyšší jakost F_i . Hodnota jakosti interferometru a optického záření F_i vychází celkem nahodile, toto může být dáno i nepřesným odečtením hodnoty $FWHM$ z obrazovky osciloskopu pomocí kurzorů.

Vzdálenost mezi peaky ΔT by měla být stejná pro laserovou diodu při napájení různými zdroji, protože tato hodnota souvisí s vlnovou délkou zdroje optického záření. Lišit by se mohla pouze hodnota ΔT pro plynný HeNe laser oproti hodnotě ΔT pro laserovou diodu QFBGLD-633-5, což se neliší, protože hodnota vlnové délky HeNe laseru je téměř stejná jako hodnota vlnové délky zkoumané laserové diody. Pro laserovou diodu QFBGLD-633-5 je hodnota ΔT téměř stejná pro všechny pracovní body při napájení jednotlivými zdroji. Ovšem pro zdroj PLCS100 se tato hodnota mírně pro jednotlivé pracovní body liší, což je způsobeno nestálostí teplotní regulace a vlnové délky.

Při pohledu na hodnoty pohybu Δz jednotlivých průběhů z Fabry-Perotova interferometru lze říci, že nejstabilnější je HeNe laser, u kterého se měřený průběh pohyboval o 0,4 μs na časové ose osciloskopu. Oproti tomu laserová dioda QFBGLD-633-5 vykazovala mnohem větší nestabilitu v rozmezí 0,4 - 4,6 μs . Nejlépe si z napájecích zdrojů laserové diody vedl zdroj Arroyo 6305, naopak nejhorší z pohledu stability pozorovaného průběhu byl proudový zdroj PLCS 100, u něhož takto velká nestabilita mohla být dána zejména nekvalitní teplotní regulací.

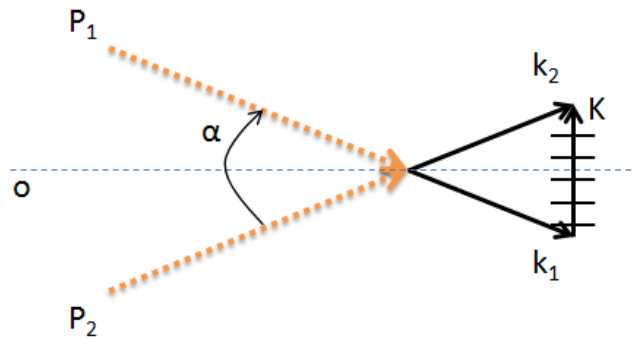
U některých zdrojů byly pozorovány na měřeném signálu i další parazitní peaky (obr. 34). Tato vlastnost může být dána zpětnými odrazy, což znamená, že se část výkonu vrací zpět do diody. Jednotlivé grafy jsou uvedeny na přiloženém datovém médiu.

6.4 Měření stability interferenčních proužků



Obr. 35: Blokové schéma zapojení pro měření interferenční struktury

Schéma pro měření interferenčních proužků se nachází na obr. 35. Laserová dioda je napájena jedním ze zkoumaných zdrojů. Výstup laserové diody je připojen na APC optické vlákno, ve kterém se paprsek dělí na dva shodné paprsky o polovině výkonu vstupního paprsku. Výstupy obou vláken jsou upevněny v držácích P_1 a P_2 tak, aby bylo možné zajistit stabilitu daného měřicího ústrojí. Oba optické paprsky dopadají pod zvoleným úhlem $\alpha = 0,7233^\circ$ na čip kamery UI-3370CP-M-GL s rozlišením 2048 x 2048, kde spolu interferují (obr. 36). Obraz z kamery je zobrazován a vyhodnocován v PC softwarem uEye Cockpit. Vzdálenost paprsků od čipu kamery činí 1600 mm a vzdálenost mezi výstupy optických vláken 10,1 mm.



Obr. 36: Detailní geometrický popis vzniku interferenční struktury

Vlnové vektory \vec{k}_1 a \vec{k}_2 určují směr šíření jednotlivých paprsků. Vlnový vektor míří ve směru pohybu vlnění. Toto platí pouze pro monochromatické vlnění. Skládáním těchto vln dostaneme interferenční proužky, které leží v rovině vektoru \vec{K} , jež je kolmá na osu měřicího ústrojí o . Vztah mezi vektory \vec{k}_1 , \vec{k}_2 a vlnovou délkou λ je dán rovnicí (rov. 53).

$$|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (53)$$

$$\vec{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (54)$$

$$\frac{|\vec{K}|}{|\vec{k}_1|^2} = \sin \frac{\alpha}{2} \quad (55)$$

$$\frac{2\pi\lambda}{2\Lambda 2\pi} = \sin \frac{\alpha}{2} \quad (56)$$

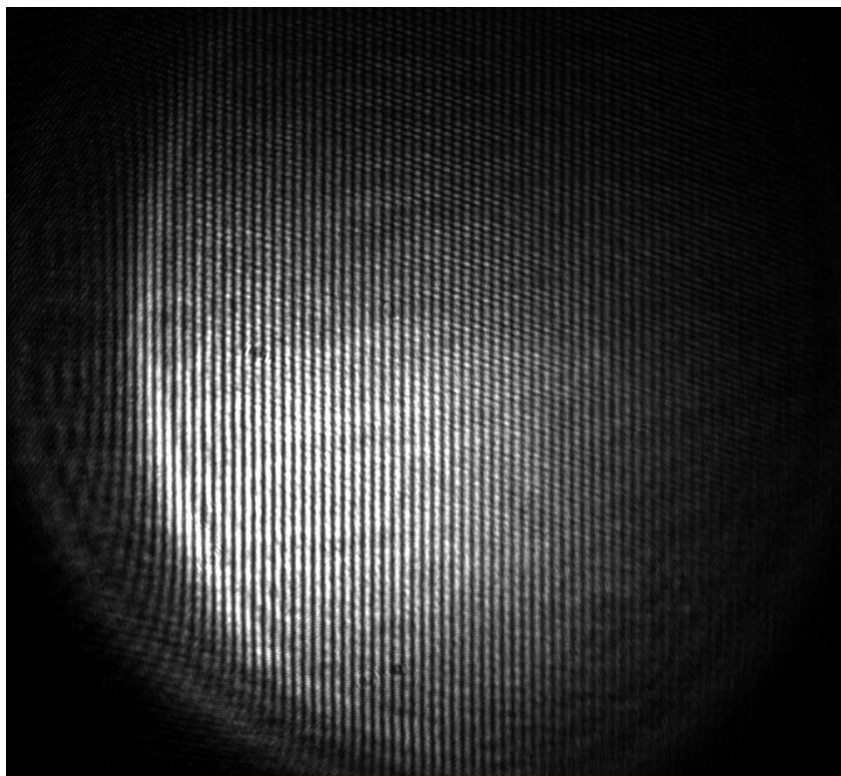
Pro malé úhly platí, že $\sin \alpha \doteq \alpha$, z čehož vyplývá, že rovnici rov. 56 lze upravit na tvar rov. 57, která popisuje vztah mezi vlnovou délkou λ a periodou interferenční struktury Λ . Změnou vlnové délky se tedy dosáhne změny periody interferenční struktury, přičemž úhel mezi oběma paprsky zůstává stejný.

$$\lambda = \alpha \Lambda \quad (57)$$

Tento matematický výpočet platí pouze pro rovinné vlnoplochy, ale v případě, že se zdroje záření nacházejí daleko od místa, kde se vlny skládají, tak je možné aplikovat tento postup i na kulové vlnoplochy, které se na větší vzdálenosti od zdroje vlnění jeví jako vlnoplochy rovinné.

6.4.1 Výsledky měření pro měření stability interferenčních proužků

Na obr. 37 je vidět obraz snímáný kamerou. Vlivem optické interference dvou dopadajících paprsků do stejného místa na snímací čip kamery vznikají tzv. interferenční proužky. Tuto interferenční strukturu lze měnit nastavením směru laserových paprsků interferenční struktury.



Obr. 37: Ukázka interferenční struktury pro zdroj Thorlabs při napájecím proudu 80 mA a 25 °C

Výsledkem měření stability interferenčních proužků byla krátká videa pořízená kamerou. Během měření nebyl zaznamenáván celý obraz, ale pouze jeho část s rozlišením 1152 x 442. Stabilita interferenčních proužků byla detekována jako pohyb interferenční struktury, přičemž nejdříve byla odečtena perioda interferenční struktury, která je dána počtem pixelů určujících vzdálenost mezi dvěma maximy nacházejícími se vedle sebe. Tato perioda byla určena z profilu interferenčních proužků, tedy interferogramu. V ideálním případě by se mělo jednat o sinusový průběh. Další potřebnou hodnotou k určení stability interferenční struktury bylo odečtení počtu pixelů, o kolik se struktura "pohnula". Z těchto dvou známých hodnot byla následně vypočtena vlnová délka.

<i>Zdroj</i>	<i>Perioda Λ [μm]</i>	<i>Vlnová délka λ [nm]</i>	<i>Pohyb struktury Δx [μm]</i>
HeNe - 25 °C	100,253	632,840	22
Arroyo 6305 - 80 mA, 16 °C	100,571	634,849	22
Arroyo 6305 - 80 mA, 25 °C	100,571	634,849	33
Arroyo 6305 - 80 mA, 35 °C	100,571	634,849	22
Arroyo 6305 - 95 mA, 16 °C	100,571	634,849	27,5
Arroyo 6305 - 95 mA, 25 °C	100,571	634,849	27,5
Arroyo 6305 - 95 mA, 35 °C	100,571	634,849	27,5
Arroyo 6305 - 115 mA, 16 °C	100,571	634,849	22
Arroyo 6305 - 115 mA, 25 °C	100,571	634,849	22
Arroyo 6305 - 115 mA, 35 °C	100,571	634,849	33
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 16 °C	100,571	634,849	27,5
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 25 °C	100,571	634,849	27,5
Thorlabs TED200C + LDC205C - 80 mA, 35 °C	100,571	634,849	22
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 16 °C	100,571	634,849	27,5
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 25 °C	100,571	634,849	22
Thorlabs TED200C + LDC205C - 95 mA, 35 °C	100,571	634,849	22
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 16 °C	100,571	634,849	22
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 25 °C	100,571	634,849	27,5
Thorlabs TED200C + LDC205C - 115 mA, 35 °C	100,571	634,849	27,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 16 °C	100,571	634,849	16,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 25 °C	100,571	634,849	33
ZLD100mA_TEC_v.1 - 80 mA, 35 °C	100,571	634,849	27,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 16 °C	100,571	634,849	33
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 25 °C	100,571	634,849	27,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 95 mA, 35 °C	100,571	634,849	44
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 16 °C	100,571	634,849	27,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 25 °C	100,571	634,849	27,5
ZLD100mA_TEC_v.1 - 115 mA, 35 °C	100,571	634,849	33
PLCS 100 - 80 mA, 16 °C	100,571	634,849	38,5
PLCS 100 - 80 mA, 25 °C	100,571	634,849	33
PLCS 100 - 80 mA, 35 °C	100,571	634,849	33

PLCS 100 - 95 mA, 16 °C	100,571	634,849	38,5
PLCS 100 - 95 mA, 25 °C	100,571	634,849	33
PLCS 100 - 95 mA, 35 °C	100,571	634,849	27,5
PLCS 100 - 115 mA, 16 °C	100,571	634,849	33
PLCS 100 - 115 mA, 25 °C	100,571	634,849	44
PLCS 100 - 115 mA, 35 °C	100,571	634,849	27,5

Tab. 7: Výsledky měření stability interferenční struktury

6.4.2 Vyhodnocení měření interferenčních proužků

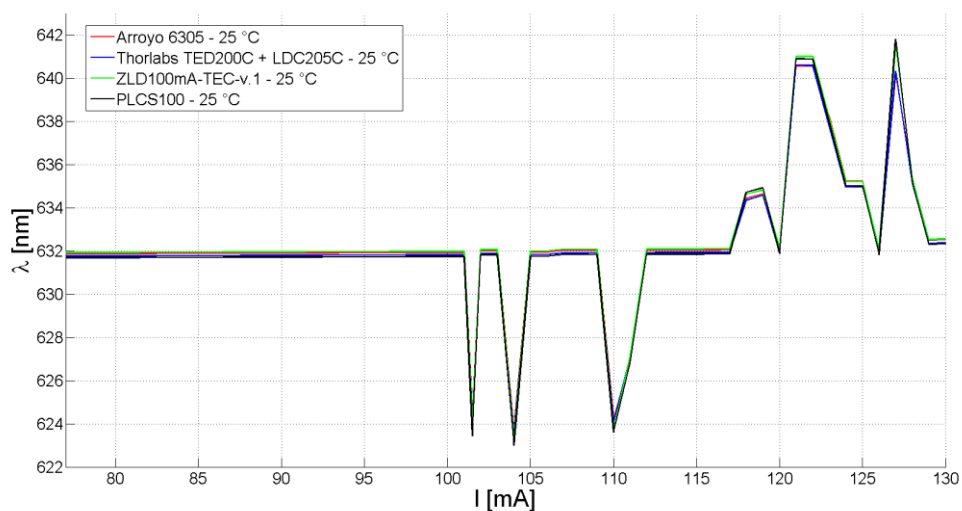
Počet proužků pro video s interferenční strukturou pro HeNe laser byl 79 a pro laserovou diodu QFBGLD-633-5 byl počet 63. Perioda interferenční struktury byla určena jako násobek počtu pixelů šířky videa s velikostí jednoho pixelu a to celé dělené počtem proužků interferenční struktury (rov. 57). Rozměr jednoho pixelu byl 5,5 μm . Velikost periody λ byla pro HeNe vypočtena 100,253 μm , což odpovídá 18,23 px, a pro laserovou diodu QFBGLD-633-5 byla 100,571 μm , což odpovídá 18,29 px na čipu kamery.

Z vypočtených dat (tab. 7) je vidět, že z vypočtené periody interferenční struktury λ a úhlu α bylo možné relativně přesně určit hodnotu vlnové délky. Vlnová délka pro HeNe laser vychází 632,84 nm, což je oproti jmenovité hodnotě 632,8 nm relativně malá odchylka. Pro laserovou diodu QFBGLD-633-5 vychází vlnová délka 634,848 nm. V porovnání s tolerančním pásmem vlnové délky udávané výrobcem (tab. 2) se výsledek liší, ovšem je nutné brát v úvahu přesnost zvolené metody. Výsledek lze označit za uspokojivý.

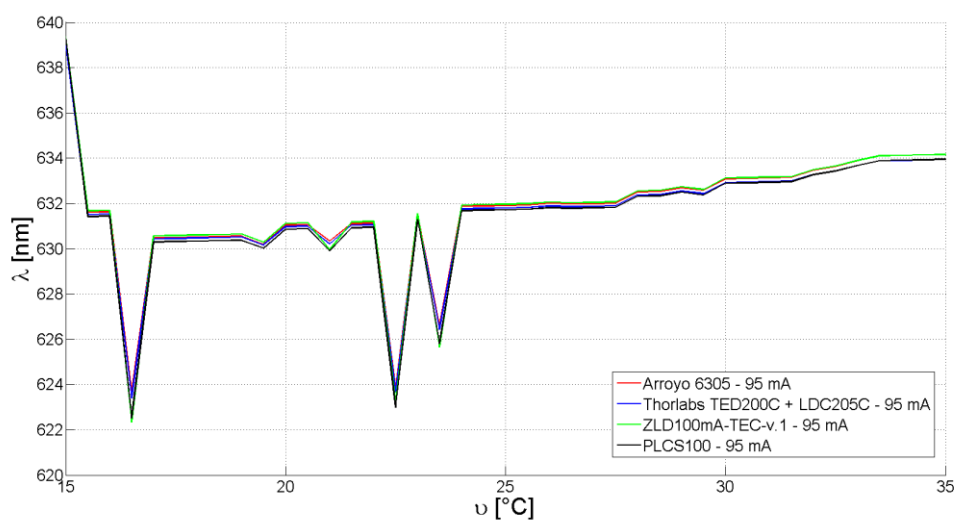
Je nutné brát na vědomí, že tato měření mohla být významně ovlivněna rušením od okolního prostředí, protože tato měřicí aparatura byla velice náchylná na jakýkoliv otřes. Z toho důvodu je nutné brát pohyb interferenční struktury Δx pouze orientačně (tab. 7). Nejlépe z pohledu stability interferenční struktury vychází proudový zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C, pro který Δx nabývá nejmenších hodnot. Pro některé proudy a teploty bylo obtížné změřit interferenční strukturu, jelikož oba laserové paprsky dosahovaly pouze malých hodnot optického výkonu, aby došlo k interferenčnímu jevu. Z tohoto důvodu muselo být nastavení dané měřicí aparatury co nejpřesnější. Kvalitu interferenční struktury lze popsat i tzv. proužkovou viditelností (kap. 1.6.1), kde viditelnost je veličina, která popisuje kontrast mezi interferenčními proužky o vyšších a nižších intenzitách.

Výsledky ovlivnilo také zaokrouhlování výpočtů. K dalšímu zkreslení mohlo dojít nepřesným určením úhlu α , na jehož velikosti je přesnost výsledků velice závislá.

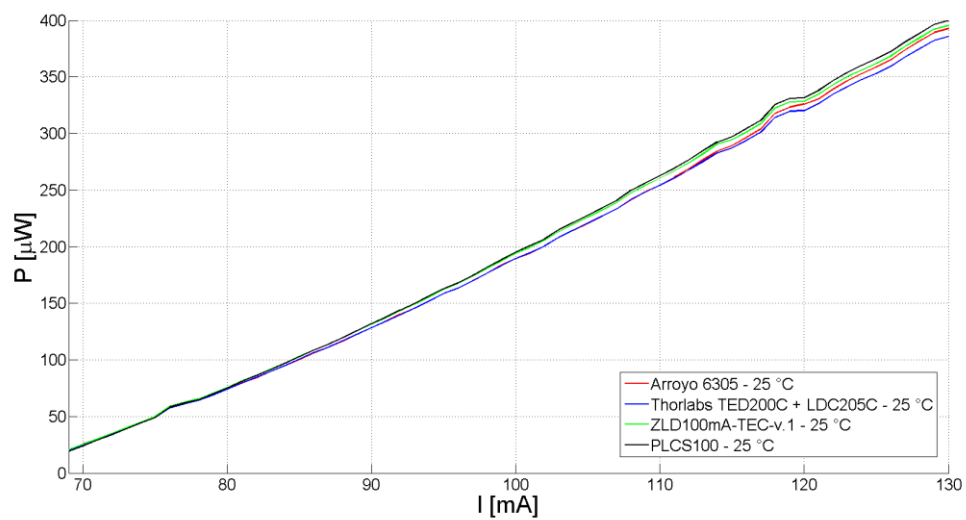
6.5 Měření optického výkonu a vlnové délky v závislosti na změně proudu a teploty



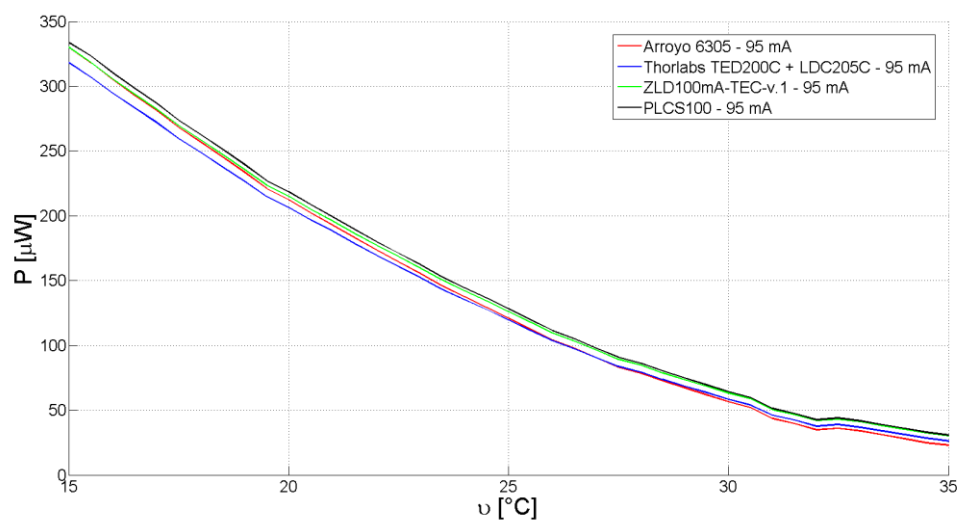
Obr. 38: Závislost vlnové délky na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C



Obr. 39: Závislost vlnové délky na změně teploty laserové diody při 95 mA



Obr. 40: Závislost optického výkonu na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C



Obr. 41: Závislost optického výkonu na změně teploty laserové diody při 95 mA

6.5.1 Vyhodnocení měření závislosti optického výkonu a vlnové délky na změně proudu a teploty

Z grafu závislosti vlnové délky na změně proudu (obr. 38) při teplotě 25 °C je vidět, že hodnota vlnové délky je v rozsahu proudu 69 - 100 mA téměř neměnná. Od hodnoty proudu 101 mA dochází při teplotě čipu 25 °C k poměrně velkým skokům. K těmto skokům dochází vlivem přechodu do jiného pracovního módu laserové diody. Tyto skoky jsou ve skutečnosti mnohem strmější, ovšem díky zvolenému kroku měření vypadá grafické vyjádření jako pozvolnější změna vlnové délky. Hodnota vlnové délky u těchto skoků je nestálá, proto je dobré provozovat laserovou diodu v chodu při různých laboratorních měřeních pouze v pásmech, kde se vlnová délka téměř nemění.

Z grafu závislosti vlnové délky na změně teploty čipu diody (obr. 39) je zřejmé, že zde rovněž jako u průběhu na obr. 38 dochází k skokům způsobeným přechodem pracovního módu diody do jiného módu. Vlivem navyšující se hodnoty teploty čipu pozvolně vzrůstá hodnota vlnové délky laserové diody.

Graf (obr. 40) popisuje závislost optického výkonu laserové diody na změně napájecího proudu jednotlivými zdroji. Křivka optického výkonu laserové diody vlivem navyšování napájecího proudu téměř lineárně roste. Malá odchylka od linearity je při proudu 118 - 119 mA. Jelikož se tato nelinearita opakuje při napájení laserové diody jednotlivými zdroji, lze tuto odchylku označit za vlastnost diody v tomto proudovém rozmezí.

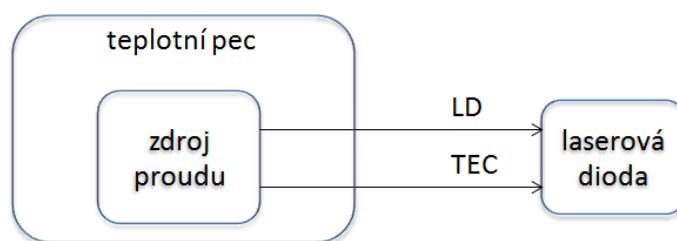
Graf závislosti optického výkonu laserové diody na změně teploty čipu (obr. 41) znázorňuje, že vlivem zvyšování teploty čipu bude při proudu 95 mA docházet k snižování optického výkonu.

K určení věrohodnosti nastavení napájecího proudu a teploty čipu byl napájecí proud a napětí na termistoru v pouzdře diody, které určuje teplotu čipu, odměřován laboratorními měřidly Agilent 34410A s přesností 6,5 digitu. Hodnoty vlnové délky a optického výkonu vycházejí téměř stejně. Odchylky mezi jednotlivými průběhy jsou dány nepřesnostmi měřidel proudu a napětí na termistoru diody. Tabulky k těmto měřením jsou uvedeny v příloze B.

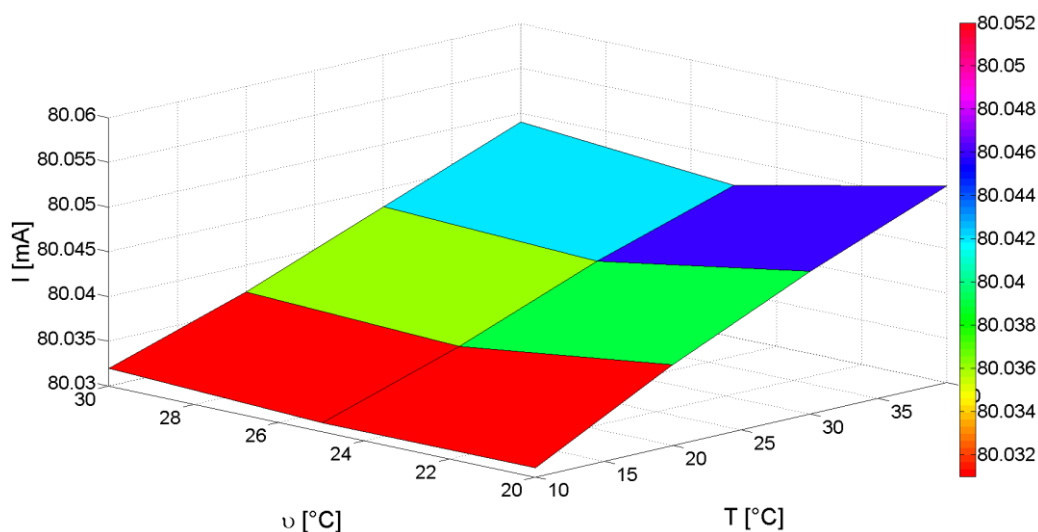
6.6 Vliv okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje

Účelem tohoto měření bylo zjistit, jak změna okolní teploty ovlivní elektroniku napájecího zdroje a tím i velikost napájecího proudu a teploty čipu diody. Stálost teploty okolí byla zajišťována v teplotní peci CTS od firmy Clima Temperatur Systeme GmbH s teplotním rozsahem od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ke sledování změn napájecího proudu a teploty čipu diody byly vybrány hodnoty 10, 20, 30 a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto hodnoty byly určeny z katalogových údajů jednotlivých napájecích zdrojů.

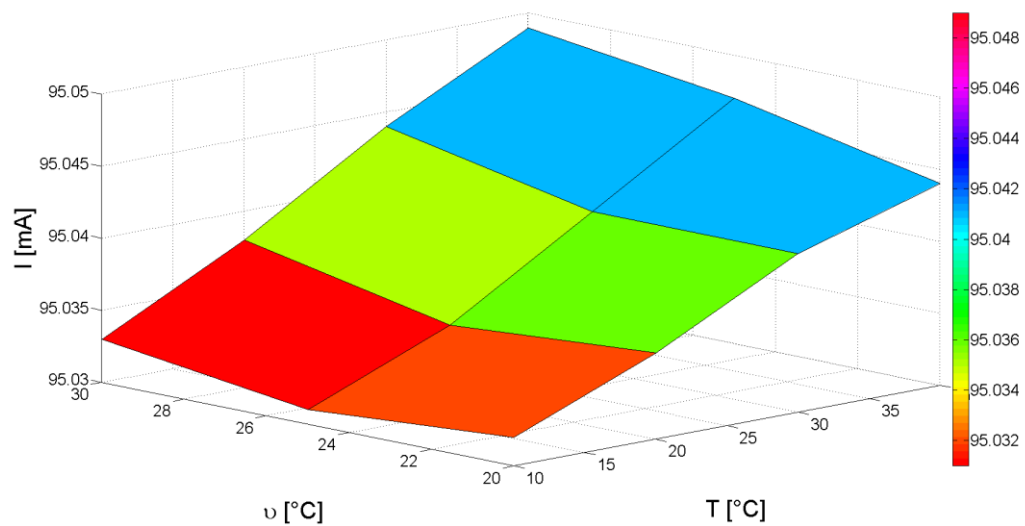
Pro toto měření byly nastavovány pracovní hodnoty proudu 80, 95 a 115 mA a teploty čipu 20, 25 a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Změna hodnoty napájecího proudu a napětí na termistoru, který měřil teplotu uvnitř pouzdra diody, byla měřena laboratorními přístroji Agilent 34410A [1] s přesností 6,5 digitu.



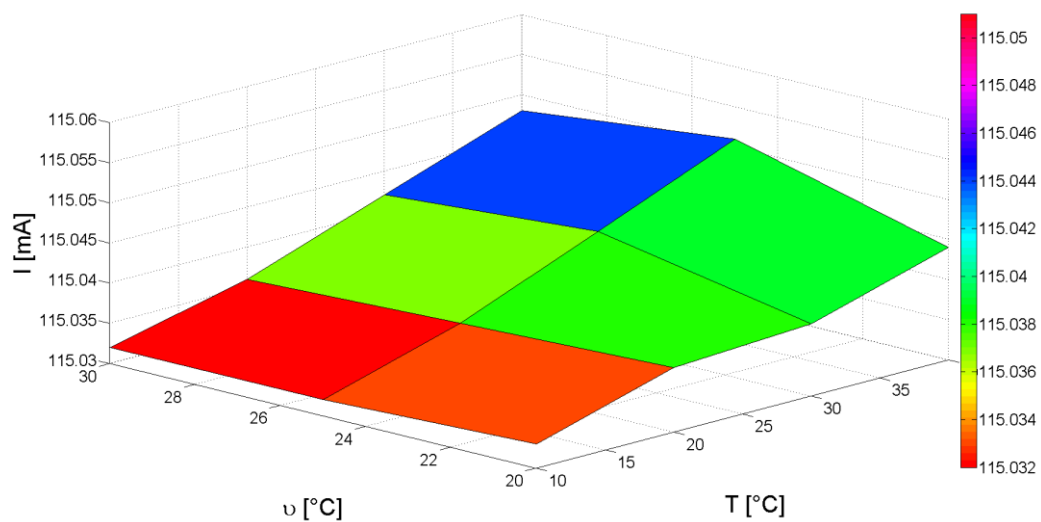
Obr. 42: Měření vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje



Obr. 43: PLCS 100 - 80 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu



Obr. 44: PLCS 100 - 95 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu



Obr. 45: PLCS 100 - 115 mA - vliv okolní teploty na napájecí proud diody a teplotu čipu

6.6.1 Vyhodnocení měření vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje

Jednotlivá měření byla prováděna při teplotě okolí 26,8 °C a relativní vlhkosti vzduchu 59 %. Z třírozměrných grafů je patrné, že teplota čipu diody je vlivem změny okolní teploty téměř neměnná. Lze říci, že k patrnějším změnám dochází pouze při vyšších okolních teplotách T . Pro nižší teploty okolí je změna teploty čipu minimální.

Vlivem růstu okolní teploty dochází k růstu hodnoty napájecího proudu v řádu setin miliampér. Tato odchylka je tedy poměrně malá, ovšem nikoliv zanedbatelná, protože pokud bude dioda na hranici přechodu do jiného módu, může být požadovaná hodnota vlnové délky diody poměrně odlišná. Z jednotlivých třírozměrných grafů nelze určit míru změny proudu v závislosti na nastavenou hodnotu proudu při 10 °C. Grafy pro ostatní napájecí zdroje jsou uloženy na přiloženém datovém médiu. Nejmenší změna proudu vlivem změny teploty okolí je u zdrojů Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C. Ovlivnitelnost napájecího proudu teplotou okolí není ovšem nikterak výrazně odlišná pro zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS100.

Závěr

Účelem této práce bylo určení potřebné stability vlnové délky laserové diody QFBGLD-633-5 použité v této práci pro měření kvality asférických povrchů. Tato stabilita měla být zaručena minimálně po dobu deseti minut měření.

K ověření stability vlnové délky a vybrání vhodného napájecího zdroje laserové diody pro interferometrická měření povrchu asférických ploch bylo zvoleno několik typů laboratorních měření. Bylo provedeno měření stability optického výkonu, vlnové délky, průběhu z Fabry-Perotova interferometru, interferenčních proužků a vlivu okolní teploty na elektroniku napájecího zdroje. Z jednotlivých měření plyne, že nejvhodnějším proudovým zdrojem s teplotní regulací pro napájení dané laserové diody byl zdroj Arroyo 6305. Podobných hodnot dosahoval i zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C. Jako nevyhovující napájecí zdroje pro účel měření kvality povrchů asférických ploch lze označit zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 a i zdroj PLCS100, protože tyto zdroje dosahovaly mnohem větší nestability vlnové délky než zdroje předešlé. U PLCS100 byla tato nestabilita způsobená zejména vlivem nevyhovující teplotní regulace čipu diody.

Stabilita vlnové délky závisí v první řadě na vhodně zvoleném pracovním bodě tj. na napájecím proudu a teplotě čipu laserové diody, protože při nevyhovujícím pracovním bodě může vlnová délka vlivem modulací značně kolísat. Závisí zejména na stabilitě teploty čipu, jelikož se vlivem i drobné odchylky může dioda přepnout do jiného pracovního módu.

Požadovaná stabilita vlnové délky závisí také na zvolené měřicí metodě kvality povrchu asférických ploch. Například pro měření kvality povrchu asférické plochy Fizeauovým interferometrem je potřeba dosáhnout nerovností povrchu nejméně $0,1\text{ }\mu\text{m}$, jinak může být měření touto metodou zkreslené. Pro tato měření je nutné zvolit maximální přípustnou změnu fáze, ke které by mohlo dojít vlivem nestabilit způsobených napájecím zdrojem či vnějšími vlivy. Z toho vyplývá, že při vlnové délce $633,5\text{ nm}$ a počáteční fázi např. 10° nesmí dojít ke změně fáze o více než cca $4,3^\circ$, jinak by docházelo k rozmazání měřené oblasti. Tomuto vyhovují zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C, ostatní zdroje vykazují příliš velkou nestabilitu vlnové délky během požadovaných 10 minut měření.

Z doporučené literatury jsem nepoužil literaturu Mikroprocesory a mikropočítače od J. Pinkera, protože jsem se vytvářením softwaru pro procesor nezabýval. Stavba prvního modelu napájecího zdroje PLCS100 a provedená měření posloužila ke stavbě druhého funkčního modelu zdroje PLCS100 s lepšími vlastnostmi teplotní a proudové regulace. Podrobnější náměry, grafy a M-files, které byly použity v této práci, jsou uloženy na příloženém DVD-ROM.

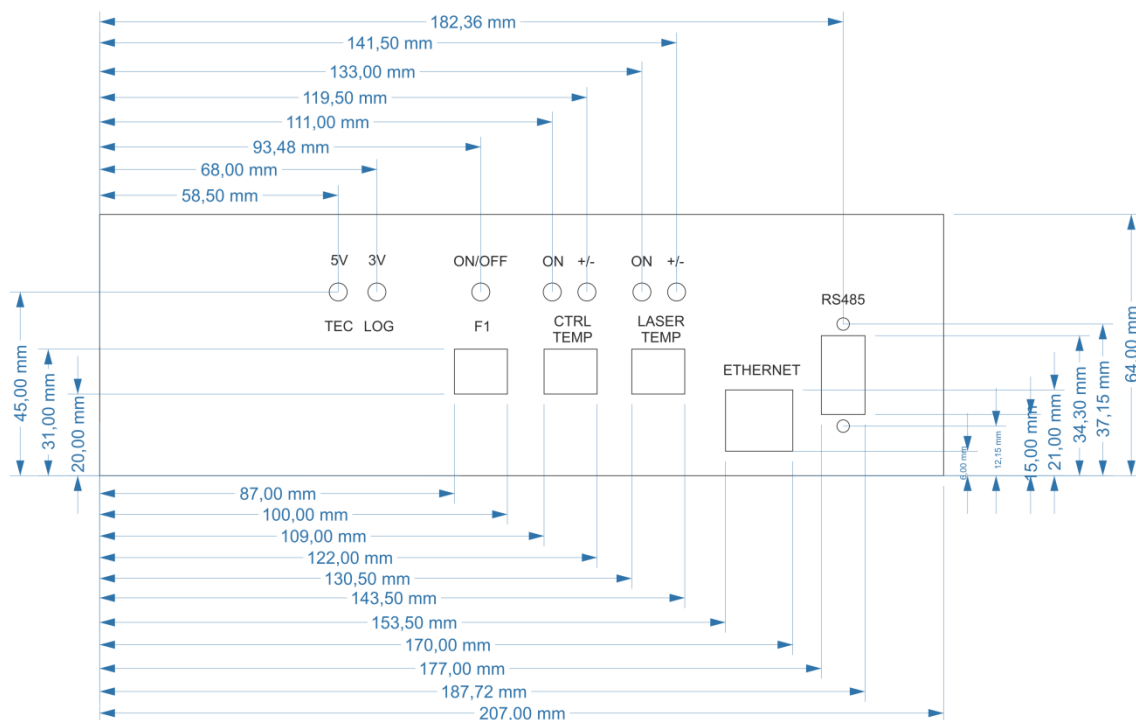
Literatura

- [1] Agilent Technologies, Inc. Agilent 34410A [Online]. 2013 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-3738EN.pdf>.
- [2] Analog Devices. ADM2687EBRIZ-RL7 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM2682E_2687E.pdf.
- [3] Analog Devices. ADR3425ARJZ-R7 [Online]. 2010 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_ADR3450.pdf.
- [4] Analog Devices. AD8628ARTZ-R2 [Online]. 2014 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8628_8629_8630.pdf.
- [5] Asférické kontaktní čočky. *Cocky.cz* [online]. Praha: Redakce, 2014, 2014-02-13 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.cocky.cz/asfericke-kontaktnei-cocky.html>.
- [6] Atmel Corporation. AT24C16C-SSHM-T [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/atmel-8719-seeprom-at24c16c-datasheet.pdf>.
- [7] Fabry–Pérot interferometer. 2015. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93P%C3%A9rot_interferometer.
- [8] Fairchild Semiconductor. KA7805AE [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/KA/KA7805AE.pdf>.
- [9] Fuka J., Havelka B.: Optika a atomová fyzika, I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV., SPN, Praha 1961.
- [10] HighFinesse. WS6-600 High-Precision Wavelength Meter [Online]. 2013 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: http://www.toptica.com/uploads/media/HighFinesse_Product_Brochure_2013.pdf.
- [11] HOŠEK, Jan. *Měření kvality asférických optických ploch* [online]. Praha. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/jan.hosek/clanky/JMO_2_2006_asfery.pdf.
- [12] Kopecký, V.: Laserová anemometrie v mechanice tekutin, TRIBUN EU, Brno, 2008, ISBN 978-80-7399-357-3.
- [13] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Zdroje proudu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 111 s. ISBN 80-860-5684-8.

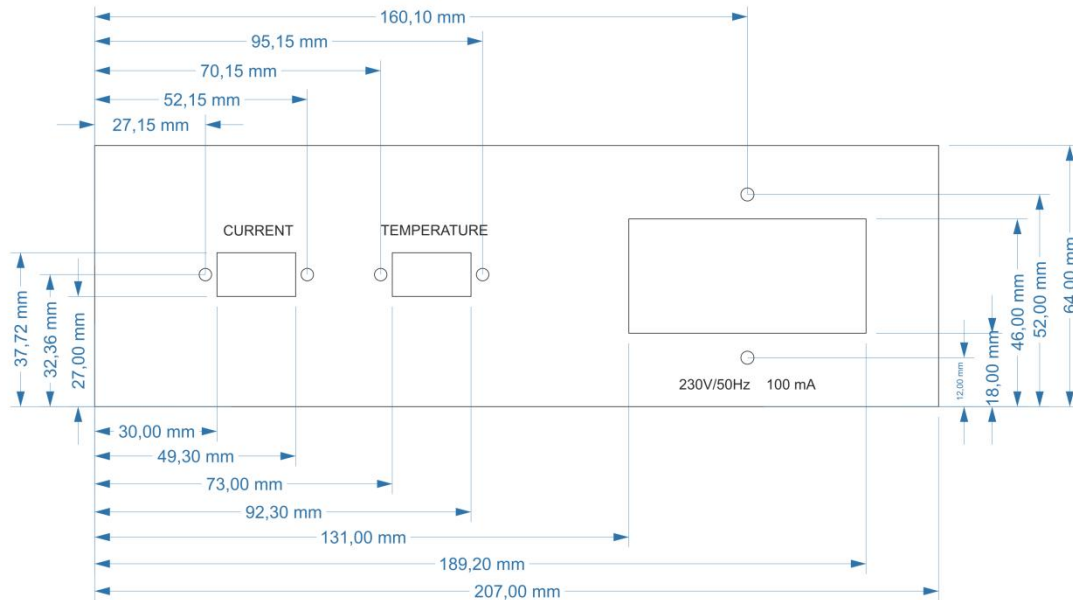
- [14] KUBINA, Pavel. Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. *FFC Public* [online]. 2013 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765.
- [15] Linear Technology. LT8610EMSE#PBF [Online]. 2012 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8610fa.pdf>.
- [16] LUKÁŠ, Michal. 2001. Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Laserové diody* [online]. (1) [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>.
- [17] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VI*. 1. vyd. České Budějovice: Koop, 2001, 287 s. ISBN 80-723-2146-3.
- [18] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2008, 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [19] Maxim Integrated. MAX1978 [Online]. 2010 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1978-MAX1979.pdf>.
- [20] Microchip Technology Inc. MCP6562-E/MS [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22139C.pdf>.
- [21] Microchip Technology Inc. LAN8742A-CZ [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/8742a.pdf>.
- [22] Monolithic DBR lasers offer deterministic wavelength tunability. Photodigm [online]. Dallas: Photodigm, Inc, 2014 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.photodigm.com/literature/applications-notes/wavelength-tuning-in-dbr-lasers>.
- [23] Peltier element. *Creativity is contagious. Pass it on.* [online]. 2011 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: http://www.mathf.comlu.com/?page=pr_peltier&lang=en.
- [24] Peltierův článek. *Pokusy z fyziky* [online]. 2012 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://pokusy.upol.cz/skolni-pokusy/elektrina-a-magnetismus/peltieruv-clanek/peltieruv-clanek-41/>.
- [25] Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2010 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>.
- [26] RIGOL TECHNOLOGIES, Inc.. SA210-5B [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: http://www.batronix.com/pdf/Rigol/Datasheet/DS4000_DataSheet_EN.pdf.

- [27] Rozdělení laserů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2014 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>.
- [28] SALEH, Bahaa E. *Základy fotoniky: fundamentals of photonics*. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, xxii, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [29] Scanning Fabry-Perot Interferometers. *Thorlabs* [online]. 2015 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=859.
- [30] Scanning Fabry-Perot Interferometers. *Thorlabs* [online]. 1999 [cit. 2015-5-15]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/tutorials.cfm?tabID=21118>.
- [31] STMicroelectronics. STM32F407VGT6 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>.
- [32] Thorlabs. LM14S2 [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.us/thorcat/10600/LM14S2-Manual.pdf>.
- [33] Texas Instruments. ADS1271IPWG4 [Online]. 2007 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1271.pdf>.
- [34] Texas Instruments. DAC1220E/2K5 [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac1220.pdf>.
- [35] Texas Instruments. LM1085IT-5.0 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1085.pdf>.
- [36] Texas Instruments. LP38691DT-3.3 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp38691.pdf>.
- [37] THORLABS. F810FC-543 [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorcat/13600/F810FC-543-AutoCADPDF.pdf>.
- [38] THORLABS. PM100D [Online]. 2011 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorcat/17600/PM100D-Manual.pdf>.
- [39] THORLABS. SA201 [Online]. 2013 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.de/thorcat/6600/SA201-Manual.pdf>.
- [40] THORLABS. SA210-5B [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.de/thorcat/19500/SA210-5B-Manual.pdf>.
- [41] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika - oborová encyklopedie*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994, 474 s. ISBN 80-858-4956-9.

Příloha A - ovládací panely



Obr. 46: Čelní panel proudového zdroje PLCS 100



Obr. 47: Zadní panel proudového zdroje PLCS 100

Příloha B - tabulky

I [mA]	λ [nm]	P [μ W]
69	-	20,76
70	-	25,62
71	-	29,78
72	-	34,70
73	-	39,54
74	-	44,92
75	-	49,89
76	-	57,94
77	631,8710	61,66
78	631,8725	64,71
79	631,8748	69,03
80	631,8774	74,29
81	631,8791	79,87
82	631,8824	84,02
83	631,8854	89,58
84	631,8879	95,24
85	631,8898	100,3
86	631,8931	106,0
87	631,8946	111,1
88	631,8973	116,6
89	631,8991	122,5
90	631,9023	128,5
91	631,9064	134,4
92	631,9077	140,5
93	631,9095	145,5
94	631,9140	152,2
95	631,9165	158,9
96	631,9198	163,2
97	631,9222	169,6
98	631,9258	176,7
99	631,9277	183,7
100	631,9300	189,4
101	631,9337	194,1
101,5	624,3045	-
102	632,0052	200,3
103	632,0105	208,2
104	623,6195	214,7
105	631,9463	220,3
106	631,9473	227,0
107	632,0225	233,4
108	632,0257	241,4
109	632,0263	248,4
110	624,1850	254,5
111	626,9637	261,2
112	632,0327	268,7
113	632,0375	276,9

114	632,0422	284,6
115	632,0430	289,3
116	632,0476	296,4
117	632,0495	304,0
118	634,4325	318,1
119	634,6256	323,4
120	632,0614	326,0
121	640,5600	330,5
122	640,5600	339,1
123	638,1925	346,5
124	635,2288	352,8
125	635,2264	358,6
126	632,0325	365,0
127	640,1967	373,7
128	635,3928	381,5
129	632,4944	389,1
130	632,5191	392,8

Tab. 8: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj Arroyo 6305

ϑ [°C]	λ [nm]	P [μ W]
15	639,0145	330,0
15,5	631,6073	318,2
16	631,6275	305,0
16,5	623,6411	293,0
17	630,4749	281,3
17,5	630,4947	268,1
18	630,5148	256,9
18,5	630,5352	245,1
19	630,5556	233,6
19,5	630,1939	220,9
20	631,0444	212,4
20,5	631,0649	202,3
21	630,3337	192,9
21,5	631,1055	183,2
22	631,1260	173,6
22,5	623,8111	164,3
23	631,4743	155,4
23,5	626,5581	145,7
24	631,8707	137,4
24,5	631,8911	129,4
25	631,9117	120,9
25,5	631,9323	112,5
26	632,0010	104,4
26,5	631,9738	97,74
27	631,9946	90,38
27,5	632,0150	83,24
28	632,5103	78,73
28,5	632,5309	72,61
29	632,6943	67,28
29,5	632,5723	61,89

30	633,0924	56,51
30,5	633,1134	52,02
31	633,1340	43,57
31,5	633,1573	39,55
32	633,4780	34,79
32,5	633,6383	36,08
33	633,8815	33,85
33,5	634,0966	30,94
34	634,1182	27,97
34,5	634,1393	24,73
35	634,1601	22,91

Tab. 9: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 95 mA - zdroj Arroyo 6305

I [mA]	λ [nm]	P [μW]
69	-	20,35
70	-	25,09
71	-	29,98
72	-	34,63
73	-	39,27
74	-	44,31
75	-	49,01
76	-	57,64
77	631,7608	61,25
78	631,7631	64,04
79	631,7656	69,14
80	631,7681	74,11
81	631,7705	79,43
82	631,7730	84,39
83	631,7754	89,64
84	631,7780	95,06
85	631,7805	100,9
86	631,7831	106,3
87	631,7860	111,2
88	631,7883	116,9
89	631,7908	122,9
90	631,7937	128,6
91	631,7962	134,2
92	631,7987	140,1
93	631,8013	145,7
94	631,8039	152,1
95	631,8066	158,5
96	631,8092	163,5
97	631,8120	169,6
98	631,8147	176,4
99	631,8172	183,1
100	631,8198	189,4
101	631,8226	194,8
101,5	624,1810	-
102	631,8935	200,7
103	631,8962	208,2

104	623,4421	214,4
105	631,8346	220,7
106	631,8371	227,1
107	631,9073	233,2
108	631,9103	241,7
109	631,9131	248,3
110	624,0126	254,1
111	627,1007	260,6
112	631,9216	267,6
113	631,9243	275,4
114	631,9270	282,8
115	631,9300	287,2
116	631,9326	294,0
117	631,9361	301,2
118	634,3496	314,6
119	634,5734	319,7
120	631,9446	320,2
121	640,6065	326,4
122	640,6002	334,6
123	637,7767	341,6
124	634,9570	347,6
125	634,9558	353,1
126	631,9170	359,2
127	640,3310	367,5
128	635,1121	374,9
129	632,3568	382,2
130	632,3796	385,7

Tab. 10: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C

ϑ [°C]	λ [nm]	P [μ W]
15	639,0108	318,3
15,5	631,5107	307,1
16	631,5300	294,6
16,5	623,4141	283,1
17	630,4339	272,0
17,5	630,4528	259,4
18	630,4719	248,8
18,5	630,4913	237,6
19	630,5107	226,7
19,5	630,1667	214,7
20	630,9755	206,5
20,5	630,9950	196,9
21	630,2144	188,1
21,5	631,0336	178,7
22	631,0531	169,7
22,5	623,6616	160,9
23	631,3843	152,2
23,5	626,4388	143,1
24	631,7612	135,2

24,5	631,7806	127,7
25	631,8002	119,7
25,5	631,8198	111,6
26	631,8851	103,9
26,5	631,8593	97,42
27	631,8790	90,63
27,5	631,8984	83,74
28	632,3694	79,50
28,5	632,3890	73,78
29	632,5444	68,51
29,5	632,4284	63,55
30	632,9230	58,36
30,5	632,9429	54,11
31	632,9625	45,98
31,5	632,9847	42,27
32	633,2896	37,65
32,5	633,4421	38,86
33	633,6733	36,77
33,5	633,8779	33,90
34	633,8984	31,14
34,5	633,9185	28,38
35	633,9382	26,22

Tab. 11: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 95 mA - zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C

I [mA]	λ [nm]	P [μ W]
69	-	20,51
70	-	25,42
71	-	30,50
72	-	35,24
73	-	40,02
74	-	45,14
75	-	49,97
76	-	58,82
77	631,9280	62,51
78	631,9304	65,37
79	631,9329	70,69
80	631,9355	75,72
81	631,9379	81,22
82	631,9405	86,30
83	631,9430	91,67
84	631,9456	97,25
85	631,9482	103,2
86	631,9509	108,7
87	631,9539	113,8
88	631,9562	119,6
89	631,9588	125,8
90	631,9618	131,5
91	631,9643	137,3
92	631,9669	143,4

93	631,9696	149,1
94	631,9722	155,6
95	631,9750	162,2
96	631,9777	167,4
97	631,9805	173,7
98	631,9833	180,7
99	631,9859	187,5
100	631,9886	194,0
101	631,9914	199,5
101,5	624,0119	-
102	632,0642	205,5
103	632,0670	213,3
104	623,1892	219,7
105	632,0037	226,0
106	632,0063	232,6
107	632,0784	239,2
108	632,0814	247,6
109	632,0843	254,4
110	623,6848	260,3
111	627,1446	267,1
112	632,0930	274,2
113	632,0958	282,2
114	632,0986	290,8
115	632,1017	294,4
116	632,1043	301,3
117	632,1079	308,7
118	634,6264	322,5
119	634,8150	327,7
120	632,1167	328,2
121	641,0078	334,5
122	641,0013	343,1
123	638,1031	350,2
124	635,2088	356,3
125	635,2075	361,9
126	632,0883	368,3
127	641,5329	376,9
128	635,3680	384,5
129	632,5398	391,9
130	632,5632	395,4

Tab. 12: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj ZLD100mA_TEC_v.1

ϑ [°C]	λ [nm]	P [μ W]
15	639,3698	330,1
15,5	631,6713	318,5
16	631,6911	305,6
16,5	622,3340	293,8
17	630,5660	282,4
17,5	630,5854	269,5
18	630,6050	258,5

18,5	630,6249	247,1
19	630,6448	235,8
19,5	630,2917	223,6
20	631,1219	215,2
20,5	631,1419	205,2
21	629,9454	196,2
21,5	631,1815	186,6
22	631,2016	177,4
22,5	623,1784	168,4
23	631,5415	159,4
23,5	625,6572	150,1
24	631,9284	142,2
24,5	631,9483	134,3
25	631,9684	126,1
25,5	631,9886	117,7
26	632,0556	109,8
26,5	632,0291	103,2
27	632,0493	96,24
27,5	632,0692	89,15
28	632,5527	84,84
28,5	632,5728	78,68
29	632,7323	73,45
29,5	632,6133	68,42
30	633,1209	63,08
30,5	633,1414	58,77
31	633,1615	50,35
31,5	633,1843	46,56
32	633,4972	41,83
32,5	633,6538	43,07
33	633,8911	40,91
33,5	634,1011	38,04
34	634,1222	35,16
34,5	634,1428	32,39
35	634,1630	30,24

Tab. 13: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 95 mA - zdroj ZLD100mA_TEC_v.1

I [mA]	λ [nm]	P [μ W]
69	-	19,20
70	-	24,13
71	-	29,23
72	-	34,07
73	-	38,91
74	-	44,16
75	-	49,05
76	-	58,05
77	631,6787	61,81
78	631,6811	64,71
79	631,6837	70,03
80	631,6863	75,20

81	631,6888	80,75
82	631,6914	85,91
83	631,6939	91,38
84	631,6967	97,03
85	631,6993	103,1
86	631,7020	108,7
87	631,7050	113,8
88	631,7074	119,7
89	631,7100	126,0
90	631,7130	131,9
91	631,7156	137,8
92	631,7182	143,9
93	631,7209	149,7
94	631,7236	156,4
95	631,7264	163,1
96	631,7292	168,3
97	631,7321	174,6
98	631,7349	181,7
99	631,7375	188,7
100	631,7402	195,3
101	631,7431	200,9
101,5	623,4487	-
102	631,8170	207,0
103	631,8198	214,9
104	623,0122	221,3
105	631,7556	227,9
106	631,7582	234,5
107	631,8314	240,9
108	631,8345	249,8
109	631,8374	256,6
110	623,6065	262,7
111	626,8238	269,4
112	631,8463	276,7
113	631,8491	284,9
114	631,8519	292,6
115	631,8550	297,2
116	631,8577	304,2
117	631,8614	311,7
118	634,7175	325,7
119	634,9189	331,0
120	631,8702	331,5
121	640,8943	338,0
122	640,8878	346,5
123	637,9462	353,8
124	635,0086	360,1
125	635,0073	365,8
126	631,8415	372,2
127	641,8199	380,8
128	635,1702	388,5
129	632,2997	396,1

130	632,3234	399,8
-----	----------	-------

Tab. 14: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj PLCS 100

ϑ [°C]	λ [nm]	P [μ W]
15	639,3219	333,7
15,5	631,4182	323,4
16	631,4383	310,4
16,5	622,5112	298,4
17	630,2963	286,8
17,5	630,3160	273,7
18	630,3359	262,7
18,5	630,3561	251,1
19	630,3764	239,6
19,5	630,0180	227,1
20	630,8606	218,6
20,5	630,8809	208,6
21	629,8993	199,4
21,5	630,9211	189,6
22	630,9414	180,2
22,5	623,0012	171,1
23	631,2865	162,1
23,5	625,8216	152,5
24	631,6791	144,3
24,5	631,6994	136,5
25	631,7198	128,2
25,5	631,7402	119,7
26	631,8082	111,7
26,5	631,7814	104,9
27	631,8019	97,82
27,5	631,8221	90,76
28	632,3128	86,32
28,5	632,3332	80,28
29	632,4951	74,86
29,5	632,3742	69,65
30	632,8895	64,23
30,5	632,9103	59,86
31	632,9307	51,31
31,5	632,9538	47,46
32	633,2715	42,67
32,5	633,4303	43,92
33	633,6712	41,73
33,5	633,8844	38,81
34	633,9057	35,90
34,5	633,9267	32,98
35	633,9472	30,79

Tab. 15: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 95 mA - zdroj PLCS 100